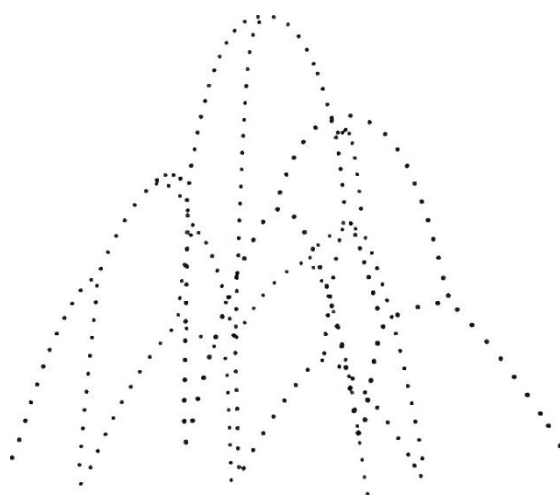


Estruturas Antifuniculares

Da procura da forma à sua construção



David Afonso Gonçalves

Dissertação elaborada para a obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura

Orientação Científica: Professor Doutor João Pedro do Carmo Fialho

Júri:

Presidente: Professor Doutor António José Morais

Vogal: Professor Doutor Paulo Manuel dos Santos Pereira de Almeida

Lisboa, FA ULisboa, Fevereiro, 2020

Estruturas Antifuniculares

Da procura da forma à sua construção

de

David Afonso Gonçalves

Resumo:

A seguinte investigação explora diferentes processos de concepção e construção de estruturas que resistem essencialmente a esforços axiais de compressão – as Estruturas Antifuniculares.

Para tal, refletirá sobre os princípios fundamentais do seu comportamento estático, os diferentes processos de procura da forma e o seu desenvolvimento construtivo ao longo da História da arquitectura.

Além da análise sobre as ideias, métodos e exemplos precedentes, a investigação será experimental. Através da realização de modelos físicos e digitais analisar-se-á as particularidades e aplicações dos diferentes métodos. Finalmente, será apresentado um novo instrumento de procura da forma que permite a manipulação física e digital de uma outra dimensão nas estruturas – o tempo.

Em última instância, a pesquisa refletirá sobre os processos elementares de procura da forma e construção de estruturas comprimidas otimizadas, leves, harmoniosas e mais naturais.

Palavras-chave: linha de pressão; estruturas antifuniculares; procura da forma; polifuniculador; captação de movimento.

Abstract:

The subsequent research explores different processes for designing and constructing structures that resist essentially axial compression stresses - the Antifunicular Structures.

To do so, it will reflect on the fundamental principles of its static behavior, on its methods of form-finding and on its constructive development throughout the History of architecture.

In addition to the analysis of previous ideas, methods and examples, the research will be experimental. Through the realization of physical and digital models, the particularities and applications of the methods will be analyzed. Finally, it will be presented an innovative instrument of form-finding that allows the physical and digital manipulation of another dimension – time.

Ultimately, the research will reflect on elementary issues for the form-finding and construction of optimized, lightweight, harmonious and more natural compressed structures.

Keywords: thrust line; antifunicular structures; form-finding; polyfuniculator; motion capture.

Agradecimentos:

É sempre difícil agradecermos. Sobretudo, quando são tantas as pessoas e os motivos pelos quais nos sentimos gratos. Contudo, depois deste período, seria uma pena partir sem deixar algumas palavras.

A minha primeira palavra é ao meu orientador, o professor João Pedro do Carmo Fialho. Em primeiro por me ter apoiado na escolha do tema, em segundo por me mostrar que existe muito mais além do que sei sobre ele. O professor tem um grande prazer em partilhar e esta dissertação não seria a mesma sem a sua orientação. Muito obrigado!

Agradeço também ao professor Alexandrino Diogo pelo seu apoio no início da investigação. Além de atenta e clara, a sua opinião foi muito motivadora.

Parte desta dissertação não se teria concretizado sem a colaboração do Laboratório de Biomecânica da Faculdade de Motricidade Humana, particularmente, sem o querido apoio da professora Sílvia Cabral.

Também quero agradecer à amabilidade da Cortiço e Netos, particularmente do João e do Tiago Cortiço; e da Elements Mosaic, especialmente do Pedro Martins, por me terem oferecido o material que permitiu a elaboração de alguns dos modelos.

Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos, particularmente ao David Xavier, Ivo Gonçalves e Xavier Ovídeo pela preciosa ajuda na realização da abóbada.

Ao longo dos últimos anos, tanto na Faculdade de Arquitetura em Lisboa como na Bezalel Academy of Arts and Design em Jerusalém, fiz grandes amigos e tive ótimos professores. Contudo, é melhor não especificar mais ninguém. Receio que me alongaria demasiado, ou pior, que me esqueceria de alguém importante.

Finalmente e principalmente, sinto-me infinitamente grato à minha família.

“There is geometry in the humming of the strings,
there is music in the spacing of the spheres.”

Pitágoras ¹

¹ “Há geometria no murmuro das cordas... há música no espaçamento das esferas.” Pitágoras conforme citado por Young, L. em “The Mystery of Matter” (1965).

Índice:

Lista de Figuras	VII
Glossário	XV
0. Introdução	1
0.1 Problemática	2
0.1.2 Design artificial/natural	3
0.1.3 Harmonia entre as formas e as forças	5
0.1.4 Proteção Ambiental.....	6
0.1.5 Recursos Locais	7
0.2 Objetivos	9
Parte I	
1. A Forma das Forças	12
1.1 O método científico e o tradicional.....	12
1.2 O equilíbrio de um arco	13
1.3 Linha de Pressão	14
1.4 A 2ª Lei de Hooke.....	16
1.5 Polígonos funiculares.....	18
1.6 Ensaio de Barlow	21
1.7 Contrafortes	23
1.8 Análise de segurança de edifícios alvenaria	26
Parte II	
2. Modelos físicos	32
2.1 A terceira dimensão	32
2.2 Modelos com cordas funiculares	33
2.3 Modelos com membranas funiculares	39
2.4 Modelos com redes funiculares	43
2.5 Outros métodos	46

3. Modelos digitais	
3.1 Relaxação Dinâmica	49
3.2 Análise de Impulsos de Rede	58
Parte III	
4. Implementação	68
4.1 Abóbadas de tijoleira	69
4.2 Cascas de betão	111
4.3 Moldes de tecido	133
Parte IV	
5. À procura da Forma	146
5.1 Criação de modelos com correntes	147
5.2 Modelos cinéticos	162
5.3 Fixação e inversão	166
6. Polifuniculador	175
6.1 Captação e manipulação digital de resultados	181
Parte V	
7. Sugestões para investigações futuras	190
8. Conclusão	191
9. Bibliografia	194

Lista de Figuras

- Fig. 1 – No fémur (imagem a. e b.) o tecido esquelético forma uma intrincada treliça de pequenas "trabéculas" cujas linhas evoluíram para suportar as cargas de tração e compressão a que está normalmente sujeito. A partir do mesmo princípio, a forma do guindaste (imagem c.) foi desenhada consoante o seu diagrama de forças. Thompson D. em "On Growth and Form" (1917) sobre o trabalho de Culmann C. e Meyer H. 2
- Fig. 2 – "O germe: A base de poder - Acima foi desenhado um diagrama de uma semente típica com dois cotilédones. Os cotilédones são folhas rudimentares especializadas que contêm um suprimento de alimento suficiente para o estágio inicial do desenvolvimento do germe. O germe é a essência; a base da identidade. Dentro do seu delicado mecanismo reside a vontade de poder: a função que é procurar e eventualmente encontrar a sua plena expressão na forma. A base do poder e a vontade de viver constituem a ideia simples sobre a qual tudo o que se segue é baseado - quanto à eflorescência." Sullivan L. em "The Germ: The Seat of Power, A System of Architectural Ornament According with a Philosophy of Man's Powers" (1924). 4
- Fig. 3 – Desenho do Centro Interpretativo de Mapungubwe de Peter Rich (2011). 8
- Fig. 4 - Os dois edifícios são compostos por famílias geométricas distintas: a clássica (a) e a funicular (b). Apesar de conterem o mesmo espaço interior, a estrutura funicular não necessita de tanto material para que as forças fluam ao longo da sua secção. (J. Ochsendorf, P. Block) 12
- Fig. 5 – Cada aduela está em equilíbrio devido à compressão exercida pelas aduelas adjacentes (cópia de Durm). 13
- Fig. 6 - Flexão gerada por uma carga transversal à estrutura. No caso, a flexão gera compressão na parte superior e tração na parte inferior. O eixo central é neutro. 14
- Fig. 7 - Idealizado por William Barlow (1812-1902) e adaptado por Fleeming Jenkin (1833-1885) o modelo do arco é composto por aduelas com faces curvas que se contactam em um só ponto. Do conjunto de pontos de contacto é possível desenhar uma linha, a linha de pressão. Através da adição de uma ou mais cargas verifica-se a adaptação da estrutura e da linha de pressão às novas condições de equilíbrio. Ewing A. desenhou o modelo de Jenkin F. em "The strength of materials" (1899). 15
- Fig. 8 - Ilustração do principio da inversão das forças (cópia duma ilustração de Poleni G.). 16
- Fig. 9 - Quatro hipóteses de funiculares com os respetivos antifuniculares. O primeiro arco é formado por cargas uniformemente distribuídas (catenária); o segundo tem uma carga pontual central; o terceiro possui várias cargas pontuais (as cargas pontuais do segundo e do terceiro arco anulam a influência do peso próprio da corrente na forma); e o quarto arco possui pesos que diminuem progressivamente à medida que o braço aumenta (parábola) (do autor). 17
- Fig. 23 - Modelos funiculares sobre os cortes transversais do Templo Expiatório da Sagrada Família (à esquerda) e da Catedral de Amiens (à direita). Os modelos representam os diferentes pesos e proporções que definem as linhas de pressão que atravessam a secção das estruturas (do autor). 17
- Fig. 10 – Cópia de um diagrama da "Nouvelle Méchanique ou Statique" (1725) de Varignon P. 18
- Fig. 11 – Polígonos funiculares com os respetivos polígonos de forças. Da "Nouvelle Méchanique ou Statique" (1725) de Varignon P. 19
- Fig. 12 - Possível linha de pressão de um arco composto por aduelas de diferentes cargas. A linha pode ser descoberta através do método gráfico (polígono funicular) e do método físico (corda suspensa). Do artigo "As hangs the flexible line" de Block P., DeJong M. e Ochsendorf J. (2006). 20
- Fig. 13 – Modelo de Barlow W. com a linha de pressão a tracejado. 21
- Fig. 14 - Ilustração do ensaio de Barlow W. (1846). 22
- Fig. 15 - À direita, a carga vertical adicionada estabiliza a estrutura mantendo a linha de pressão no núcleo central do contraforte. Do livro "Form and Forces"(2008) de Allen E. and Zalewski W. 23
- Fig. 16 - Análise de equilíbrio da Catedral de Palma de Maiorca através de polígonos funiculares. (Rubió.J.). 24
- Fig. 17 - Cópia de um desenho de Gaudí A. do processo gráfico de conceção das abóbadas do Parque Guell. As abóbadas inclinadas do Parque Guell foram concebidas com polígonos funiculares que incluem as cargas verticais do seu próprio peso e os impulsos horizontais exercidos pelo terreno. Utilizando o mesmo princípio do pináculo gótico, a condução da linha de pressão para as fundações é feita através da carga vertical imposta pela coluna. 25
- Fig. 18 - Catedral de S. Paulo em Londres de Wren C. (1720). (a) 26
- Ilustração da linha de pressão descoberta através de uma corda suspensa (Addis, 2007). (b)
- Desenho da secção arquitetónica. (Poley A., 1925). 26

Fig. 19 - Desenho da secção da cúpula da Catedral de São Pedro e da corda com os pesos relativos. (Poleni G.).	27
Fig. 20 - Comparação de dois arcos com secções distintas através da análise com o Método dos Elementos Finitos (a) e (b) e da análise com a linha de pressão (c) e (d). A razão de t/R do arco (a) e (c) é 0.08 e a de (b) e (c) é 0.16. (Block P.).	28
Fig. 21 – Através de um cabo suspenso esta ilustração demonstra a deformação provocada por uma carga pontual na linha de pressão de um arco. Quanto maior a carga, maior a deformação da linha. Caso a deformação da linha seja demasiado incoerente com a forma da estrutura geram-se diferentes articulações (fendas) e um hipotético mecanismo de colapso. (Heyman J.).	29
Fig. 24 - Projeto para o Reichstag, 1872, (Gösling F.).	33
Fig. 25 – Análise de equilíbrio gráfico das colunas dendriformes do Templo Expiatório da Sagrada Família. (Sugraries).	35
Fig. 26 - Reprodução do modelo funicular com cordas e do respetivo antifuncular em gesso da Igreja Colônia Güell em Santa Coloma de Cervelló (desenvolvido em parceria pela Universidade de Innsbruck e pela Universidade de Moscovo).	36
Fig. 27 - Modelos desenvolvidos para a Igreja da Colônia Güell (em cima) e fotografias do modelo pintadas (em baixo). (Gaudí A.).	37
Fig. 28 - Cada saco possuía pesos relativos à carga do elemento estrutural.	38
Fig. 29 - Modelos funiculares de tecido e trama. As estruturas em grelhas não têm tanta tensão tangencial e, por isso, tendem a ter formas de dupla curvatura sinclásticas. Ao contrário destas, as estruturas em tecido propendem a criar vincos e curvaturas anticlásticas. (Isler H.).	40
Fig. 30 – Modelo de acrílico utilizado para a análise da distribuição de tensões e do comportamento de enfunamento da casca da fábrica de Kilcher, em Rechterswill (1965).	40
Fig. 31 – Constituída por um tecido humedecido suportado por um balão e uma vara, esta estrutura foi endurecida por congelamento, o que permitiu a posterior remoção dos suportes. (Isler H.).	41
Fig. 32 - Com apenas um tecido coberto de uma fina camada de gelo foi possível gerar estas esbeltas estruturas autoportantes. As estruturas mais utilizadas nestas experiências foram pneumáticas e polifunculares. (Isler H.).	41
Fig. 33 - Exemplos das “infinitas” possibilidades de cascas. (Isler, H.).	42
Fig. 34 – Modelo funicular de uma rede (em baixo) e o respetivo antifuncular (em cima).	44
Fig. 35- A forma da casca em grelha do Multihalle de Mannheim (1975) foi descoberta através do modelo em grelha funicular (Otto F.).	45
Fig. 36 – Nesta fotografia podemos ver através do reflexo do charco de água a forma invertida do pavilhão da Multihalle de Mannheim.	45
Fig. 37 - Auto-organização de um respingo de leite. Foto de D’Arcy Thompson (1917).	46
Fig. 38 – Diagrama de fluxo de trabalho de RD.	51
Fig. 39 - Transformação através do aumento da força vertical (a). Transformação através da diminuição da densidade da mesh (b). Transformação através da triangulação da mesh (c). (do autor)	52
Fig. 40 – Exemplo do código criado através do Grasshopper com os plug-ins Kangaroo e Weaverbird.	52
Fig. 41 – Diferentes vistas de uma estrutura antifuncular criada através de RD. (do autor)	53
Fig. 42 – Além da criação de estruturas polifunculares, é possível a criação de estruturas formadas pela flexão dos seus membros (elásticas). Este processo viabiliza a criação de cascas em grelha de madeira.	54
Fig. 43 – Sequência da flexão de uma casca em grelha. (do autor)	55
Fig. 44 – As diferenças entre a curva catenária e a curva elástica acentuam-se à medida que a flecha aumenta. Tal se deve à rigidez do material e à sua resistência à flexão. (do autor)	56
Fig. 45 - Outro plugin que permite a manipulação de certos fenómenos físicos é o FlexHopper. Este simulador possibilita a criação de simulações sobre a deformação de partículas livres, fluidos, corpos rígidos, corpos moles, estruturas tracionadas e tecido através da adição de inúmeras forças internas e externas aos corpos. (do autor)	57
Fig. 46 – Relação entre a forma duma estrutura comprimida equilibrada (G), a sua projeção horizontal (Γ) e o diagrama recíproco (Γ^*) (Block P.).	59
Fig. 47 – A projeção das forças da estrutura no espaço (à direita) e o diagrama de forças (à esquerda) têm uma relação recíproca. O equilíbrio de um nódulo num é garantido por um polígono fechado no outro e vice-versa. (Block P.).	59
Fig. 48 – Para uma projeção de forças (a) existem múltiplas hipóteses de diagrama de forças recíprocos possíveis (Block P.).	60

- Fig. 49 – Aumentando a escala do diagrama de forças recíproco aumenta-se o impulso horizontal do sistema e, assim, cria-se uma estrutura com uma flecha menor. Este fenómeno é equivalente ao afastamento do polo ao longo do eixo principal de um polígono funicular (Block P.). 60
- Fig. 50 - Diagrama de fluxo de trabalho de TNA. 61
- Fig. 51 – Modelos impressos em 3D sem cola entre as aduelas e os respetivos desenhos digitais da forma da estrutura comprimida em equilíbrio (G), a sua projeção horizontal (Γ) e o seu diagrama recíproco (Γ^*). (Block P.) 62
- Fig. 52 - Modelo impresso em 3D, o respetivos desenho da estrutura comprimida em equilíbrio (G), a sua projeção horizontal (Γ) e o seu diagrama recíproco (Γ^*). Este modelo não tem cola entre as aduelas e o seu impulso horizontal é travados por um fio tracionado ao longo do perímetro da estrutura. Na imagem inferior vemos o momento em que o fio tracionada está prestes a ser cortado, o que originará a sucessiva queda da estrutura. (Block P.) 63
- Fig. 53 - Igreja de Sta. Maria de Belém do Mosteiro dos Jerónimos. Lisboa. 65
- Fig. 54 – (a) Projeção horizontal da estereotomia das abóbadas da nave central da Igreja de Sta. Maria de Belém. (b) Diagrama recíproco de forças. (c) Axonometria da estrutura resultante. Este modelo pode ser comparado à atual estrutura e assim verificar se essa é a solução de forças que permite o seu equilíbrio. (Block P. e Lachauer L.) 65
- Fig. 55 – Quatro estágios da construção da abóbada tijoleira. Até ao aparecimento do cimento (no século XIX) o aglomerante utilizado em todas as fiadas de tijoleira era gesso. Contudo, com o seu advento, o cimento começou a ser utilizado nas camadas subseqüentes à primeira. 70
- Fig. 56 – Três tipos de abóbadas de alvenaria. Da esquerda para a direita: a abóbada de arco-perfeito (com cimbres), seguida da abóbada núbica (que pela forma e inclinação das aduelas não requer a utilização de cimbres), e, por último, a abóbada de tijoleira (que pela leveza e rápido endurecimento do gesso não exige quaisquer suportes). 70
- Fig. 57 - Claustro do convento de Santo Domingo de Valencia (1368). 71
- Fig. 58 – Capela da rainha Maria no convento da Trindade em Valencia. 72
- Fig. 59 - Construído no final do séc. XV o Hospital General de Valencia é um importante exemplo que marca a evolução da abóbada de tijoleira. As coberturas do hospital eram inicialmente de madeira. Porém, em 1545, o hospital sofreu um incêndio que levou à sua destruição e reconstrução. Devido ao dano do desastre, a rápida reconstrução foi feita através dum sistema incombustível - a abóbada de tijoleira. 73
- Fig. 60 – Construção de abóbadas de tijoleira (Blondel e Patte, 1771-1777). Apesar da importância para a difusão do processo construtivo, os tratados de *Compte d’Espie*, e de Blondel e Patte, difundiram opiniões incorretas sobre os seus princípios estruturais. Nomeadamente, a ideia de que as cascas de tijoleira atuavam de forma “monolítica” e que não geravam qualquer impulso horizontal. 74
- Fig. 61 – O teatro La Massa foi o primeiro projeto de Guastavino com uma estrutura de grande vão em abóbada de tijoleira. A abóbada tem 17 metros de diâmetro, por 3 metros de flecha e um óculo de 4 metros de diâmetro. A secção mínima tem apenas 5cm e possui nervuras interiores de 10cm de espessura. O impulso vertical da abóbada é suportado por colunas de ferro fundido ao redor da sala e os impulsos horizontais são contrariados por uma cinta metálica tracionada. 76
- Fig. 62 –Para a Biblioteca Pública de Boston o arquiteto Charles Mckim visionou uma estrutura de ferro com tetos falsos de abóbadas de tijoleira. Contudo Guastavino persuadiu Mckim sobre a resistência estrutural das abóbadas de tijoleira. Na fotografia podemos ver Rafael Guastavino em cima de um arco das abóbadas (à direita). 77
- Fig. 63 – Nas duas perspectivas sobre a Biblioteca Pública de Boston (1889) verificamos a distinção estética entre o tratamento das abóbadas tesseladas de mosaicos do átrio principal e as abóbadas “cruas” da sala de leitura. 78
- Fig. 64 –O projeto da City Hall Subway Station de Nova-Iorque serviu de terminal para a primeira linha metropolitana de Nova-Iorque. Embora já não possa acomodar os novos comboios esta construção permanece em excelente estado de conservação. A sua dinâmica espacial e estética resulta da combinação dos padrões cromáticos e geométricos das abóbadas de tijoleira vidrada de Guastavino (possível através do controlo sobre a manufatura e acabamento das suas cerâmicas) com as claraboias, candeeiros e baixos relevos desenhados por Heins & LaFarge. 79
- Fig. 65 – A alta arcada abobadada do Queensboro Bridgemarket transformou a grelha ortogonal de colunas num conjunto harmonioso de curvas sinuosas que transmitem uma clara e iluminada plenitude. 80

- Fig. 66 – De cima para baixo e da esquerda para a direita observa-se: a patente de abóbadas de tijoleira armadas (1910); detalhes construtivos de uma abóbada de tijoleira genérica da companhia; e a análise gráfica de forças através de polígono funiculares da Capela de St. Paul, Nova-Iorque (1906). 82
- Fig. 67 – Até então, a cúpula da catedral neogótica de St. John the Divine foi construída mais rapidamente (15 semanas) e a um custo muito inferior do que qualquer outra estrutura do mesmo tamanho. De base quadrangular, a casca possui um comprimento diagonal de 41 metros apesar da sua espessura mínima possuir apenas 11cm. Esta foi a primeira estrutura onde a companhia utilizou armações metálicas entre as fiadas de tijoleira (localizadas nas áreas de maior tensão). 83
- Fig. 68 –A estrutura da “Oyster Bar” (1912; para Warren&Wetmore) é composta por uma dúzia de abóbadas de tijoleira vidrada de flecha rasa que transmitem uma elegante, profusa e confortável ambiência ao espaço interior. 84
- Fig. 69 –A geometria, textura e disposição espacial das escadas abóbadas da Carnegie Mellon University em Pittsburgh (1913) demonstram o perfeccionismo estético e estrutural das abóbadas de tijoleira de Rafael Guastavino Jr. 85
- Fig. 70 – Poster publicitário com algumas das maiores cúpulas construídas pela companhia (1910). 86
- Fig. 71 – O sótão da Casa Mila (1912) é composto por arcos catenários com diferentes flechas, luz e direções que, em conjunto, geram uma ondulante sequência que evoca o esqueleto de uma gigante cobra em movimento. Tanto os arcos como as abóbadas são formados por diferentes fiadas de tijoleira. 87
- Fig. 72 - O sótão da Casa Batlló (1906) é um espaço sereno, elegante e luminoso construído com uma série de arcos catenários e abóbadas de tijoleira rebocados. A modelação do reboco arredondou os cantos oferecendo um agradável toque e uma leve transição lumínea entre as suas faces. 88
- Fig. 73 – Superfícies regradas utilizadas por Antoni Gaudí. Da fila superior para a inferior: o hiperboloide de revolução utilizado nas claraboias de tijoleira da Sagrada Família, o paraboloide hiperbólico utilizado nas abóbadas de tijoleira da Igreja da Colônia Güell e na Sagrada Família e os conoides utilizados na cobertura de tijoleira das Escolas da Sagrada Família. (do autor) 90
- Fig. 74 – Perspetivas exteriores e interiores da Igreja da Colônia Güell. 91
- Fig. 75 – Cobertura das Escolas da Sagrada Família (1909). 92
- Fig. 76 - Para evitar a necessidade de abóbadas e permitir a receção e transmissão de luz natural todos os espaços entre o esqueleto estrutural da Sagrada Família foram reduzidos ao mínimo. Tal foi feito através de um conjunto de claraboias de tijoleira em hiperboloides de revolução conectados através de paraboloides hiperbólicos. Do livro de Legendre G. “MatheMatics of space” (2012). 93
- Fig. 77 – Estrutura do Templo Expiatório da Sagrada Família. 94
- Fig. 78 - A nave de produção não tem janelas. A sua iluminação é feita através das claraboias das abóbadas (orientadas a Norte). 95
- Fig. 79 – Perspetivas da fábrica Vapor Aymerich, Amat y Jover 96
- Fig. 80 - A estrutura da Masia Freixa, de Lluís Muncunill (1914), é composta por arcos catenários com enjuntas fraccionadas. Estas suportam a cobertura sinuosa constituída por abóbadas de tijoleira revestidas de uma argamassa cimentícia com pequenos cristais embutidos. 97
- Fig. 81 - Adega de Sant Cugat del Vallès. Devido à sua magnificência, as adegas de César Martinel i Brunet são chamadas de “catedrais de vinho” (“les catedrals del vi”). 98
- Fig. 82 – Entre as abóbadas das diversas escolas, as abóbadas de tijoleira da Escola de Ballet, de Vittorio Garatti, são as que tem secções mais esbeltas. A escola é composta por um conjunto de cúpulas entre as quais serpenteiam caminhos entrelaçados cobertos por distintas abóbadas de canhão. 100
- Fig. 83 – Pavilhão principal da Escola Ballet. 101
- Fig. 84 – Abóbada de tijoleira de dimensão aproximada de 7,5m por 5,5m com forma aparentemente livre. BLOCK Research Group, ETH (2010). 103
- Fig. 85 - A construção do Centro Interpretativo de Mapungubwe gerou um envolvimento social. O método construtivo requer mão-de-obra intensiva e, para tal, foram empregados homens e mulheres das comunidades que antes da construção receberam uma formação sobre abóbadas de tijoleira. Projetos desta natureza podem ter um impacto que os transcendem: gerar novas tradições construtivas, revitalizar a economia e fomentar uma nova ligação entre as pessoas e a arquitetura. 105
- Fig. 86 – A tijoleira das abóbadas, a pedra do revestimento e a madeira das pérgulas são originários da região. Esta ligação entre a forma, cor e materiais da paisagem cria uma impressão de pertença e intemporalidade entre a arquitetura e a natureza. 106
- Fig. 87 - A forma das abóbadas e a iluminação desenhada pelas ripas de madeira dão uma atmosfera serena e solene ao interior do espaço. 107

Fig. 88 – Vistas interiores e exteriores da Biblioteca Maya Somaiya.	109
Fig. 89 – Apesar de ter uma espessura ínfima um ovo de codorniz pode aguentar uma carga à compressão de 0,9 kg; de galinha uma carga de 32,9 kg; e de avestruz uma carga de 225 kg. Contudo, um pequeno esforço transversal parte facilmente qualquer uma das cascas (ver ensaios da ZwickRoell).	111
Fig. 90 – Algumas das geometrias mais utilizadas para a geração de cascas (do autor).	113
Fig. 91 – Sequência de colocação do cimbre.	115
Fig. 92 – A Estrutura definitiva do Hangar para dirigíveis de Orly (1921) foi feita através da translação do cimbre ao longo de um eixo.	115
Fig. 93 - O Mercado coberto de Leipzig (1928) de Ritter H. e Dischinger F. possui duas cúpulas de planta octogonal que têm 75 metros de vão, 29 metros de altura e uma espessura de apenas 9cm. Suportadas por oito colunas inclinadas, as cúpulas são compostas por oito cascas de dupla curvatura, o que possibilitou uma relação entre peso e vão sem precedentes.	116
Fig. 94 – Mercado de Algeciras (1935) de Arcas M. e Torroja E. De planta octogonal, a cúpula apoia-se sobre oito colunas periféricas. Esta tem um vão de 48 metros, apenas 9cm de espessura e é perfurada por uma claraboia com 10 metros de diâmetro. Para distribuir o peso para os pilares, a cúpula possui abóbadas periféricas em consola que possibilitam a entrada de luz.	117
Fig. 95 - A parte principal do complexo industrial da Fábrica de Borracha Brynmawr (1951) de Powers M. e analisado pela Ove Arup & Partners era um espaço coberto por nove cascas de betão armado que possuíam diversas claraboias circulares. Cada uma das cúpulas tinha 26 m de comprimento, 19 m de largura e menos de 9cm de espessura. As colunas de suporte conectavam as cascas em V, garantindo que os seus esforços fossem conduzidos axialmente pela estrutura.	117
Fig. 96 – Em cada uma das naves do hangar de Marignane (1952) de Auguste Perret e Nicolas Esquillan a cobertura é constituída por abóbadas parabólicas de 101,5 metros de vão, por 60 metros de comprimento e apenas 18cm de espessura. Para impedir o desenrolar das superfícies elas foram travadas com diafragmas rigidificadores com 10 metros de espaçamento entre si.	118
Fig. 97 - Garagem de Stockwell, Londres (1953) de Adie, Button & Partners, Thomas Bilbow e análise estrutural de Alfred Edward Beer. A cobertura da garagem tem 120 metros de comprimento e é composta por cascas de curvatura positiva suportadas por nervuras arqueadas com flecha rasa. Interrompida por claraboias transversais, cada casca estende-se por 59 metros e tem uma largura de 13 metros de comprimento.	118
Fig. 98 – Construção do Palacete de Desportos de Roma.	120
Fig. 99 – Vista interna do Palacete de Desportos de Roma.	120
Fig. 100 - Salão de festas das termas de Chianciano em planta elíptica.	120
Fig. 101 – Fotografia das linhas isostáticas criadas pela carga de compressão a uma chapa de acrílico circular (fotoelasticidade).	121
Fig. 102 - Embora as linhas de pressão possam ser descobertas através de processos físicos (fotoelasticidade e interferometria holográfica), Arcangeli calculou a disposição das nervuras através de cálculos matemáticos (teoria das placas e lâminas). Todavia, atualmente é possível encontrar as linhas isostáticas do campo de forças através do Método dos Elementos Finitos e a sua sucessiva solução estrutural através de Otimização Topológica.	121
Fig. 103 – A Capela Lomas de Cuernavaca (1958) demonstra a compreensão que Candela F. adquiriu sobre as possibilidades formais, estruturais e construtivas dos paraboloides hiperbólicos. A casca autoportante possui uma dupla curvatura negativa dramática com uma altura de 21m, luz de 31m, e, em certas partes, uma espessura de apenas 4cm. Esta estrutura estendeu os limites do que se julgava possível realizar.	122
Fig. 104 – O paraboloide hiperbólico é uma superfície de dupla-curvatura gerada por segmentos de reta. Acima são demonstradas diferentes possibilidades geradas através da combinação de vários paraboloides hiperbólicos de perímetro reto. (Allen, E. e Zalewski, W. (2008)).	123
Fig. 105 - A cobertura do restaurante “Los Manantiales”, em Xochimilco, de Ordoñez A. e Candela F. (1958) é uma casca composta por quatro paraboloides hiperbólicos seccionados e radialmente distribuídos que se intersectam entre si.	123
Fig. 106 – Vista exterior e interior do restaurante “Los Manantiales”, A. Ordoñez e F. Candela (1958). Chamada de “La Flor” pelos habitantes da cidade, a casca tem um diâmetro máximo de 42,3m, vãos entre apoios de 32,3m e uma espessura média de apenas 4cm.	124
Fig. 107 – As esculturas desenvolvidas por Naum Gabo (1890/1977) demonstram algumas das infinitas possibilidades formais de superfícies regradas com perímetros curvilíneos.	125

- Fig. 108 – Vista aérea da fábrica de Sicli, em Genebra (1969) de Hilberer C. e Isler H. A parte com maior dimensão da casca tem um vão de 30 a 35 metros de comprimento, a diagonal do conjunto tem um vão com cerca de 58 metros e a espessura geral da casca é de 10 centímetros. Este rácio é superado sem a utilização de vigas, ou qualquer elemento estrutural adicional. 126
- Fig. 109 - O conceito estrutural de Isler para a criação de casca finas de betão lembra a importante relação entre a forma e as características naturais dos materiais. 127
- Fig. 110 – Jardim de Inverno formado pelo vazio da intersecção das duas partes da casca. 127
- Fig. 111 – Imagens do processo construtivo de diferentes cascas de Isler. De cima para baixo observa-se a estrutura primária de madeira do cimbreiro. Esta era posteriormente coberta por uma estrutura secundária de tábuas onde, depois, eram colocados os varões de aço (que permitiam o aumento da resistência a esforços de tração) que reforçavam o betão enfim projetado, vibrado e alisado sobre a estrutura. 128
- Fig. 112 - Projetado por Eero Saarinen, e estruturalmente analisado por Ammann & Whitney, o Trans World Flight Center (1962) é um dos modelos do otimismo Neo-Futurista e da liberdade de exploração geométrica. Todavia, as formas do terminal não são a consequência de uma lógica estrutural otimizada, de modo que foi necessário o aumento significativo da espessura dos apoios (alguns com espessuras aproximadas de 6,5 metros). 130
- Fig. 113 – Ópera de Sidney, projeto de arquitetura de Jørn Utzon, e análise estrutural de Ove Arup 130
- Fig. 114 – Com linhas suaves e onduladas a cobertura do Crematório de Kakamigahara em Gifu (2006) flui levemente ao lado do lago que a reflete. Com uma espessura média de 20cm, a casca transforma-se em colunas dispersas no espaço, criando uma harmonia compositiva simbólica reconfortante. Projeto de Toyo Ito e otimização de Mutsuro Sasaki Consultants. 132
- Fig. 115 - Estudo de Alberto Pugnale sobre a otimização computacional da forma do Crematório de Kakamigahara (2008). Os parâmetros utilizados para a otimização da forma procuraram que esta resistisse a esforços axiais de compressão e a uma certa fração de esforços de tração e flexão (para esmorecer o movimento de terremotos ou outras cargas dinâmicas). A otimização da forma inicial pode gerar várias possibilidades que permitirão a seleção da forma mais adequada. 132
- Fig. 116 - Sistema construtivo de tetos à prova de fogo patenteado por G. Lilienthal sob o nome “Terrast Decke” (1897). 134
- Fig. 117 - Ao longo do séc. XX surgiram várias patentes de sistemas construtivos que incorporam diferentes inovações técnicas ao sistema de G. Lilienthal: a. Fletcher (1917); b. Govan e Ashenhurst (1928), c. Waller (1934); d. Farrar e outros (1937); e. Parker (1971); f. Redjvani (1999). 134
- Fig. 118 - O arco de Ctesifonte, ou Taq-i-Kisra, localizado na atual cidade iraquiana Salman Pak, a sul de Bagdade. 136
- Fig. 119 – Pormenor construtivo do sistema “Ctesiphon”. 137
- Fig. 120 - Com espessuras extraordinárias de 2,5cm os primeiros protótipos cobriram vãos de 32m. As últimas estruturas de Waller permitiam, porém, cobrir áreas de 150m com espessuras mínimas de 13cm. Para tal, foram utilizados arcos de treliças e aço pré-esforçado nos quais o tecido era suspenso. O reboco final era feito através de cimento projetado. 138
- Fig. 121 – Silos para armazenamento de cereais em Nicosia, Chipre (autor desconhecido). O princípio latente no sistema de Waller pode ser explorado de inúmeras maneiras e originar as mais variadas formas polifuncionais. 138
- Fig. 122 - Centro de Reabilitação de MUPAG 139
- Fig. 123 – Diferentes patentes de estruturas pneumáticas enrijecidas. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: Neff (1942), Baily (1943), Bilner (1953), Neff (1959), Turner (1961), Bini (1969), Harrington (1971), Heifetz (1972), Prouvost (1977), South and South (1979) e Hale (1988). 140
- Fig. 124 –Escola pública de Narrabeen North (1974). Inventadas nos anos 60, as cascas pneumáticas de Dante Bini, as “Binishells”, tiveram uma longa evolução ao longo das décadas. As “Binishells” derivavam de uma única célula pneumática confinada por um perímetro circular que, em seguida, era seccionada (para conceber as fenestraçãoes ou a conexão a outras células). 141
- Fig. 125 - Recentemente, Nicolás Bini (o filho) criou um novo sistema de “Binishells”. Segundo a companhia, as melhorias sobre o sistema original permitem uma maior flexibilidade arquitetónica (sobretudo na conformação da planta), simplificação do processo de construção e integração de tecnologias passivas de aquecimento / refrigeração. 141
- Fig. 126 – Perspetiva exterior e interior do “Palais Bulles” (construído entre 1975 a 1989) de Antti Lovag. 142

Fig. 127 – Modelo de estruturas arborescentes e abóbadas antifuniculares geradas a partir de moldes de tecido fechados e abertos. (CAST, “Team Gravity” (2007))	144
Fig. 128 – Modelo funicular invertido através de fotografia (antifunicular). Materiais: correntes, passe-vite, argolas. (do autor)	148
Fig. 129 – Modelo funicular e as respetivas sombras projetadas com um foco luminoso. Materiais: correntes, argolas e aro de bicicleta. (do autor)	150
Fig. 130 – Outras perspetivas do mesmo modelo. A relação geométrica entre os arcos respeita uma criteriosa lei de proporção. Os arcos dispostos nos diversos níveis têm uma flecha cujo o comprimento é igual à distância entre os seus apoios. (do autor)	151
Fig. 131 – Diferentes perspetivas de um modelo realizado através da disposição radial de um arco pelos vértices de cordas de circunferência que não passam pelo seu centro. A intersecção entre os arcos cria “losangos arqueados” que diminuem progressivamente ao longo da sua ascensão ao óculo. Materiais: correntes, argolas e aro de bicicleta. (do autor)	152
Fig. 132 – As correntes deste modelo têm a mesma extensão. Contudo a sua flecha e luz aumentam e diminuem com uma relação de proporção inversa à medida que os pontos de apoio se afastam e aproximam dos dois eixos perpendiculares da circunferência. Materiais: correntes, argolas e aro de bicicleta. (do autor)	153
Fig. 133 - Estrutura funicular regradada de hiperboloides de revolução de sentidos opostos com bases circulares. Materiais: correntes, argolas e passe-vite. (do autor)	154
Fig. 134 – Sombra projetada de uma estrutura funicular formada por hiperboloides de revolução de sentidos opostos com bases quadrangulares de dimensão distinta. Os segmentos que formam os hiperboloides de revolução estão relaxados devido à tração da corrente central. Materiais: correntes, argolas e chapa metálica cortada a laser. (do autor)	155
Fig. 135 – Duas perspetivas de uma coluna formada por dois modelos. O modelo superior é funicular e o inferior antifunicular. Este conjunto forma uma coluna que “possui uma superfície invisível de atração” pois todos os arcos (tanto do modelo inferior como do modelo superior) parecem estar a ser atraídos por um plano central. A este fenómeno decidi chamar “planotropismo”. (do autor)	156
Fig. 136 – Capitel funicular. Materiais: correntes, argolas e chapa metálica cortada a laser. (do autor)	157
Fig. 137 – Estrutura antifunicular com diferentes pesos. Os pesos permitem amenizar os impulsos horizontais transportando as cargas para a direção vertical. Materiais: correntes, argolas, chumbos e chapa metálica cortada a laser. (do autor)	158
Fig. 138 – Estrutura antifunicular de uma casa com dois pisos formada por abóbadas de canhão e abóbadas cruzadas de catenárias com diversas flechas e comprimentos. Materiais: correntes, argolas, chumbos e chapa metálica cortada a laser. (do autor)	160
Fig. 139 – Modelo antifunicular gerado por um movimento de rotação. Quanto maior a velocidade, maior o afastamento dos arcos exteriores. Materiais: correntes, argolas, passe-vite. (do autor)	163
Fig. 140 – O movimento do modelo foi gerado pela translação do apoio central ao longo de um eixo vertical. Este é consequente da ligação do ponto a um fio de nylon que por sua vez está conectado a um carrete. O fio sobe e desce à medida que o carrete gira no sentido positivo e negativo através de um motor. Materiais: correntes, argolas, aro de bicicleta, motor de passo, carrete e Arduino Uno. (do autor)	164
Fig. 141 – Sequência do movimento. (do autor)	165
Fig. 142 – A fixação e inversão dos modelos de correntes pode ser feita com recurso a solda, argamassa fina ou cola. Dependendo da variação da quantidade de fixante em cada elo, sucederão mais ou menos deformações na forma total que originaram estalactites (funiculares) ou estalagmites (antifuniculares) dependendo da orientação da estrutura. Este fenómeno processa-se em diversas escalas fractais (da estrutura como um todo até ao seu pormenor). (do autor)	166
Fig. 143 – Modelos de gaze de gesso solidificados com água pulverizada. O primeiro e o segundo modelo foram invertidos, contudo, o terceiro foi rodado. É interessante verificar que no modelo inferior toda a sua forma contraria a resistência do ar ou da água que ela sentiria em movimento (pois que, tal como a gravidade, estas forças, em estados não caóticos, são uniformemente distribuídas) sugerindo assim, a sua possível aplicação em veículos terrestres e aquáticos. (do autor)	167
Fig. 144 – Os modelo antifuniculares de rendas com cola branca permitem encontrar estruturas extremamente complexas compostas por uma intrincada variação de cheios e vazios que possibilitam a entrada e difusão da luz em padrões inesperados. (do autor)	168
Fig. 145 – Modelo assimétrico de rendas e cola branca. (do autor)	169

Fig. 146 – Cascas constituídas por folhas de mosaico e cimento cola. Realizado através da ação da gravidade sem qualquer cimbire. (do autor)	170
Fig. 147 – Estágios da construção da abóbada antes da sua inversão. (do autor)	172
Fig. 148 – A cerâmica é um dos materiais mais desperdiçado na construção, e este desperdício gera resíduos que são geralmente despejados em aterros e acabam por afetar a fertilidade de grandes extensões de solo. Deste modo, através do reaproveitamento da cerâmica, a técnica permitiu diminuir o seu impacto ambiental. (do autor)	173
Fig. 149 – A eficiência estrutural da casca de 1.45m de comprimento, 0.60m de largura, 0.45m de altura e 2cm de espessura é possível devido à elevada resistência da cerâmica à compressão e à sua geometria antifunicular. (do autor)	174
Fig. 150 – Os imanes são posicionados em ambas as faces do espelho suspenso (virado para baixo) e são eles que unem e suportam as correntes, tramas ou tecidos que formam as diferentes estruturas funiculares. (do autor)	176
Fig. 151 – É possível o uso de uma planta de referência, para definir as posições dos diferentes apoios. (do autor)	176
Fig. 152 – Além dos apoios, as diversas conexões entre correntes são feitas com imanes. (do autor)	177
Fig. 153 - Perspetivas de um modelo realizado com o Polifuniculador. (do autor)	178
Fig. 154 – É possível manipular outros materiais como redes ou tecidos. (do autor)	180
Fig. 155 - Diagrama de fluxo de trabalho de MOCAP.	182
Fig. 156 – Esquema simplificado da ligação dos componentes da captação de movimento (adaptado de um diagrama da Vicon).	183
Fig. 157 – Sequência da captação e tratamento de dados. A captura de movimento não é realizada sobre o corpo inteiro, mas sobre marcadores estrategicamente dispostos nele. No caso, os marcadores são passivos (ao invés de emitirem luz, eles refletem uma determinada onda lumínea, os infravermelhos). Após a captação dos marcadores é possível gerar o esqueleto e o avatar da estrutura cinética. (autor desconhecido)	183
Fig. 158 – Para converter as correntes em marcadores elas foram pintadas de negro e revestidas com fita refletiva (marcadores). A fita reflete os infravermelhos que são emitidos pelos leds situados ao redor das objetivas das câmaras de filmar que, por sua vez, são qualificadas para a captação desta onda lumínea. (do autor)	183
Fig. 159 – À esquerda são expostos diferentes momentos do processo de procura da forma com o polifuniculador e à direita a respetiva captação em tempo real dos pontos no ambiente digital. (do autor com a colaboração do Laboratório de Biomecânica da Faculdade de Motricidade Humana da Universidade de Lisboa)	185
Fig. 160 – Duas vistas ortogonais (em cima) e uma perspetiva (em baixo) de um único momento da captação. (do autor com a colaboração do Laboratório de Biomecânica da Faculdade de Motricidade Humana da Universidade de Lisboa)	186
Fig. 161 – A captação da deslocação das partículas produzida por diferentes forças no mecanismo físico permite compreender a dinâmica da linha de pressões ao longo de um determinado período temporal. Isto possibilita o entendimento das diferentes forças que possam atuar na estrutura e, eventualmente, a conceção de soluções estruturais adequadas às mesmas. (do autor com a colaboração do Laboratório de Biomecânica da Faculdade de Motricidade Humana da Universidade de Lisboa)	187
Fig. 162 – Interpretação digital dos pontos (1.) em curvas (2.) e das curvas em tubos (3). (do autor)	188
Fig. 163 – Simulação de uma hipotética instalação concebida através do Polifuniculador. (do autor)	192

Glossário

Abatimento – Quociente da flecha pela corda.

Abóbadas de Tijoleira – Casca esbelta constituída por várias fiadas de tijoleira (cada uma com cerca de 2cm) que formam no conjunto uma secção média de 6 a 10cm. As juntas da primeira camada são argamassadas com gesso, o que, devido ao seu rápido endurecimento, permite o assentamento “imediato” das peças. Os impulsos horizontais da abóbada são muito inferiores a qualquer outro sistema de alvenaria, permitindo assim, a redução do volume e carga dos elementos que transportam os seus esforços para os apoios. Normalmente, a construção não requer suportes (cimbres ou escoras) devido à leveza da tijoleira e ao endurecimento instantâneo do gesso na primeira camada.

Aduela – Pedra com a qual se constrói um arco.

Arco – Elemento estrutural de forma curva que suporta essencialmente esforços axiais de compressão.

Arcobotante – Arco inclinado exterior destinado a suportar os impulsos horizontais das abóbadas interiores.

Articulação – Sistema de união que permite a livre rotação dos elementos.

Auto-organização – Ordem emergente das interações locais de um sistema.

Captura de movimento – Processo de captação do posicionamento de marcadores físicos em movimento para o ambiente digital.

Carga crítica – Carga a partir da qual a estrutura é instável.

Carga pontual – Força agindo sobre um ponto da estrutura.

Carga uniformemente distribuída – Força repartida de maneira constante sobre a estrutura (por ex. a força da gravidade).

Casca – Peça laminar não plana sujeita preferencialmente a esforços axiais.

Casca em grelha de madeira – Estrutura espacialmente curva constituída por uma grelha de barras de madeira.

Catenária – Curva adquirida por um fio suspenso com massa uniforme.

Chave – Peça de fecho de um arco ou abóbada.

Centro de gravidade – Ponto resultante das forças gravitacionais aplicadas num corpo.

Cofragem – Molde fechado que conforma um material em estado fluído (cimento, gesso, resina epoxídica ou qualquer outro aglomerante) até este transitar para o estado sólido

Contraforte – Coluna massiva apta a suportar os impulsos gerados por outros elementos estruturais.

Cúpula – Casca de dupla curvatura sujeita principalmente a esforços axiais de compressão.

Curva Elástica – Curva gerada pela flexão de uma peça linear.

Deformação – Transformação de uma estrutura que se traduz na variação das suas dimensões através da aplicação de ações externas ao corpo. As deformações podem ser classificadas em três tipos: **deformação elástica** (o corpo retorna ao seu estado original após o efeito de tensão); **deformação plástica** (o corpo não retorna ao seu estado original após o efeito de tensão) e **ruptura** (o corpo rompe-se em duas ou mais partes após o efeito de tensão). Existem 5 processos essenciais de tensão que podem ser aplicados: **tração** (tensão que provoca o afastamento das partículas em sentidos opostos); **compressão** (tensão que provoca a aproximação das partículas em sentidos opostos) **corte** (tensão que provoca o deslocamento paralelo das partículas em sentidos opostos); **flexão** (gerada por uma força transversal ao corpo que provoca tensões de compressão e de tração) e **torção** (tensão que provoca a rotação das partículas em torno do eixo geométrico do corpo).

Design Paramétrico – Design gerado a partir de um código composto por regras e parâmetros variáveis. O termo provém das equações paramétricas e refere-se ao uso de certos parâmetros ou variáveis que podem ser manipuladas para alterar o resultado final do sistema. Embora o termo seja usado em referência a sistemas computacionais, existem precedentes de modelos matemáticos e físicos que resultam dos mesmos princípios.

Enfunamento / Varejamento – O enfunamento é a encurvadura de uma placa ou casca e o varejamento é a encurvadura de uma peça linear (geradas por excessivos esforços de compressão).

Equilíbrio – Situação estável na qual um sistema não apresenta tendência a deslocar-se.

Esbelteza – Quociente entre o menor comprimento da estrutura e a sua secção transversal.

Escora – Peça linear de eixo retilíneo sujeita principalmente a esforços de compressão.

Estado anisotrópico de tensões – Estado de tensão de um corpo cujas secções estão submetidas a diferentes tensões.

Estado isotrópico de tensões – Estado de tensão de um corpo cujas secções estão submetidas a iguais tensões.

Estrutura comprimida – Estrutura em que as ações aplicadas são transmitidas aos elementos por esforços de compressão. Este tipo de estrutura é constituído essencialmente por materiais resistentes a este tipo de tensões (como a pedra, tijolos, betão, etc.).

Estrutura pneumática – Estrutura constituída por uma membrana estabilizada pelo diferencial de pressões exercida sobre a sua superfície (por ex. células, bolhas de sabão e balões insuflados).

Estruturas tracionada – Estrutura em que as ações aplicadas são transmitidas aos elementos por esforços de tração. Este tipo de estrutura é constituído essencialmente por materiais resistentes a este tipo de tensões (como os tecidos, membranas, cabos, cordas, etc.).

Fio – Peça linear que só pode resistir a solicitações de tração segundo o seu eixo.

Flecha – Maior segmento de reta, normal à corda, compreendido entre esta e o eixo de um arco ou o folheto médio de uma abóbada.

Força – Causa capaz de alterar o movimento, a direção e a velocidade de um corpo.

“Form-Finding” (Procura da forma) – Processos cuja conceção da forma é o resultado de sistemas de forças naturais. Através dos processos de “procura da forma”, o arquiteto incita a conceção aproveitando as características naturais do sistema que utiliza. Estes podem conduzir tanto à otimização da sua estrutura quanto à otimização dos processos construtivos exigidos para a sua realização.

Funicular / Antifunicular / Polifunicular – Do latim *funiculum* (corda), o funicular é a forma ideal dada por um conjunto de forças sobre uma corda. Assim sendo o antifunicular é a forma oposta a esta. Enquanto que uma estrutura “funicular” suporta essencialmente esforços de tração, uma estrutura “antifunicular” suporta essencialmente esforços de compressão. Em certas ocasiões da investigação é referido o termo polifunicular para mencionar ambas as formas.

Geratriz, Diretriz – Numa superfície regrada a curva que se move paralelamente sobre uma curva estacionária chama-se geratriz e a curva estacionária chama-se diretriz.

Homeostasia – Adaptação de um sistema dinâmico para um novo estado de equilíbrio.

Homotetia – Transformação de ampliação ou redução de um objeto físico ou abstração geométrica a partir de um ponto. A homotetia preserva: os ângulos, as razões entre os segmentos de reta e o paralelismo.

Holismo – Ideia de que um sistema não pode ser explicado apenas pela soma dos seus componentes.

Lei da Elasticidade (Robert Hooke) – Princípio físico que demonstra que a força é proporcional à deformação que causa num corpo.

Lei do quadrado-cubo (Galileo Galilei) – Princípio físico que descreve a relação entre o volume e a área de um corpo à medida que as suas dimensões aumentam ou diminuem.

Este princípio afirma que quando uma forma cresce em tamanho o seu volume cresce mais rápido do que a sua área. Esta afirmação tem implicações diretas na resistência mecânica dos materiais (materiais estáveis em escalas reduzidas podem colapsar em escalas maiores).

Lei Fundamental da Dinâmica (Isaac Newton) – A Lei fundamental da dinâmica, também chamada a segunda Lei de Newton, afirma que num sistema de referencia inercial, a força aplicada sobre um objeto é igual à massa (constante) a multiplicar pela sua aceleração. Por outras palavras, a força aplicada a um corpo produz uma aceleração diretamente proporcional a ela.

Linha de pressão – Fluxo percorrido pelas forças. Ela corresponde ao polígono funicular de cargas.

Materiais ativos/passivos – Materiais passivos ou frágeis têm pouca elasticidade e a sua deformação passa rapidamente de um estado elástico para a rutura. É o caso da pedra, tijolo ou betão (materiais que resistem à compressão). Ao contrário destes, os materiais ativos são elásticos. Eles permitem uma elevada deformação até transitarem para um estado plástico. É o caso do aço e do tecido (materiais que resistem à tração).

Mecanismo – Sistema instável sobre o qual se produz um movimento cinético.

Membrana – Elemento estrutural de superfície solicitado exclusivamente a esforços de tração.

Membranas Tensioativas – Películas líquidas originadas após o emergir de um perímetro fechado (p. ex. um arame circular) num liquido tensioativo (p. ex. a glicerina).

Morfogénese – Processo biológico e físico que resulta na forma de um organismo.

Nervura – Reforço em forma de viga de uma laje ou casca.

Otimização – Resolução de um problema que permite maximizar ou minimizar uma função.

Otimização Topológica – Processo de otimização que permite a subtração de toda a matéria num determinado volume por onde as forças não passam.

Pináculo – Elemento localizado no topo de um contraforte destinado a conduzir os impulsos horizontais da estrutura para o núcleo central do contraforte.

Polifuniculador – Do grego “polloí” (muitos) e do latim “funiculum” (funicular) o Polifuniculador é um instrumento criado pelo autor que permite gerar múltiplas soluções estruturais funiculares e antifuniculares, estáticas ou cinéticas. O Polifuniculador é um instrumento simples. Ele é composto por um espelho suspenso horizontal, imanes e pelos diferentes materiais que compõem o modelo da estrutura (como correntes, tramas, molas

ou tecidos). Pode ainda ser utilizada uma planta de referência aos pontos de apoio (contudo, ela não é vinculativa).

Pré-esforço – Técnica que consiste na introdução de um estado prévio de tensões (por ex. através de cabos tracionados), de modo a melhorar a resistência das estruturas à tração (o que viabiliza a realização de vãos de maior dimensão e mais esbeltos).

Relaxação Dinâmica – Técnica digital que permite encontrar o posicionamento do movimento das partículas duma grelha ou curva elástica provocado por um determinado conjunto de forças até estas alcançarem um estado de equilíbrio estático.

Superfície Anticlástica – Superfície composta por curvaturas de sentido oposto. (por ex. paraboloide hiperbólico e conoide). As estruturas tridimensionais que funcionam só à tração têm normalmente geometrias anticlásticas.

Superfície Mínima – Superfície com a menor área possível dentro de um determinado perímetro ou volume. (por ex. a esfera). Um dos métodos de descobrir a forma de uma superfície mínima é com membranas tensioativas.

Superfície Regrada – Superfície gerada pela movimentação de uma linha sobre dois perfis. Por exemplo: o conoide, o hiperboloide de revolução e o paraboloide hiperbólico. Apesar deste tipo de superfície ser espacialmente dinâmica o seu processo construtivo pode ser relativamente simples (pois é composta por elementos retos).

Superfície Sinclástica – Superfície composta por curvaturas de sentido concordante. (por ex. paraboloide elíptico ou cúpulas de revolução). As estruturas tridimensionais que funcionam só à compressão têm, normalmente, geometrias sinclásticas.

Tirante – Elemento linear da estrutura em tração.

Tropismo – Tropismo é o fenómeno biológico que orienta o crescimento de um organismo em resposta a um estímulo ambiental. Da mesma maneira que se classifica o crescimento de uma planta em atração à luminosidade de fototropismo, ou à água de hidrotropismo, o autor decide classificar o fenómeno de atração ou repulsa de um corpo a um ponto de “pontotropismo”, a uma reta de “retotropismo” e a um plano de “planotropismo”.

Vão limite de uma estrutura – Dimensão de maior vão de uma estrutura sujeita exclusivamente ao peso próprio com uma determinada forma e material a partir da qual ela torna-se instável.

Vibração – Movimento gerado pela alteração do sentido, direção e velocidade de diferentes forças no corpo.



0. Introdução

Como “criador”, o arquiteto tem uma sede de descoberta. Uma descoberta de novas formas, materiais, contextos, símbolos e harmonias. Ele imagina um espaço novo e procura projetar essa imagem na realidade. Contudo, a realidade tem as suas condições naturais - uma delas é a força da gravidade.

Para entender a importância da gravidade, perguntemo-nos: como seria o mundo sem ela?

Talvez o mar dispersar-se-ia no espaço, a Terra deixaria de ser redonda, o chão não estaria sob os nossos pés... talvez as casas teriam de ser ancoradas, as pedras de um arco deixariam de comprimir, uma viga não fletiria com o seu próprio peso... O mundo e a arquitetura, tal como conhecemos, deixariam de fazer sentido.

A consciência desta condição é o primeiro passo para a concepção de qualquer estrutura elegante, harmoniosa e equilibrada.

Esta dissertação explorará algumas metodologias para a criação e construção de estruturas que suportam esforços axiais de compressão, esforços que a força da gravidade e a força normal exercem sobre qualquer corpo – estas são as Estruturas Antifuniculares.

0.1 Problemática

0.1.1 A forma e a estrutura

“When engineers (...) discuss aesthetics and architects study what cranes do, we are on the right road.”

Ove Arup ²

A criação artística e a investigação científica são frequentemente consideradas opostas – a ciência é entendida como a análise rigorosa de leis externas da Natureza, enquanto a arte é entendida como a expressão livre da vontade interna do Ser. À sombra desta ideia, o desenvolvimento do projeto é atribuído ao arquiteto (*à priori*) enquanto que a análise estrutural é atribuída ao engenheiro (*à posteriori*).

Esta repartição de funções permite uma especialização nas diferentes etapas temporais, contudo, também provoca uma rutura entre as partes e o todo, entre a conceção da forma e a invenção da sua estrutura.

Como conceber uma arquitectura cuja a forma e a estrutura são uma e a mesma coisa?

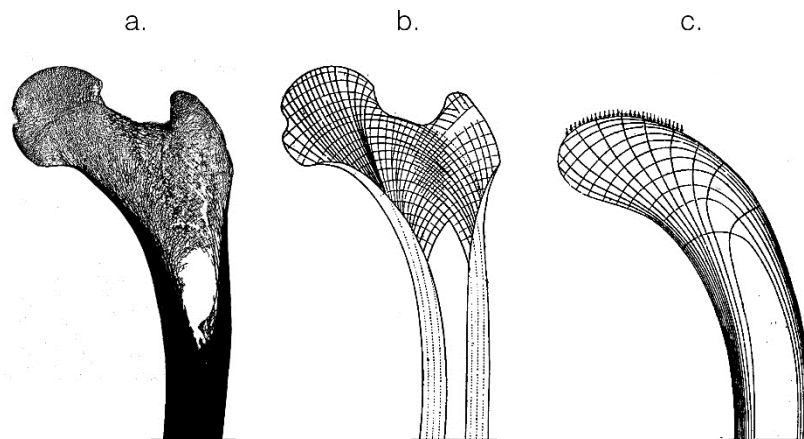


Fig. 1 – No fémur (imagem a. e b.) o tecido esquelético forma uma intrincada treliça de pequenas "trabéculas" cujas linhas evoluíram para suportar as cargas de tração e compressão a que está normalmente sujeito. A partir do mesmo princípio, a forma do guindaste (imagem c.) foi desenhada consoante o seu diagrama de forças. Thompson D. em “On Growth and Form” (1917) sobre o trabalho de Culmann C. e Meyer H.

² “Quando engenheiros (...) discutem estética, e arquitetos estudam o funcionamento de um guindaste, estamos no caminho certo”. Ove Arup conforme citado por Allen E. e Zalewski W em “Form and Forces: Designing Efficient, Expressive Structures” (2008).

0.1.2 Design artificial/natural

“It is the pervading law of all things organic and inorganic, of all things physical and metaphysical, of all things human and all things superhuman, of all true manifestations of the head, of the heart, of the soul, that the life is recognizable in its expression, that form ever follows function. This is the law.”³

Louis Sullivan

É impossível compreender uma forma sem entender as forças que a condicionam.

Uma árvore transforma-se com a força da luz (fototropismo), as suas raízes absorvem os nutrientes dissolvidos pela força da água (hidrotropismo), os seus ramos caem com a força da gravidade (geotropismo), as suas radículas crescem com a força do tato (tigmotropismo), as suas flores são fertilizadas com a força de reações químicas (quimiotropismo)...⁴ a forma da “árvore” enuncia um vasto conjunto de energias, trópicos, fronteiras e relações invisíveis e, tal como ela, qualquer geometria natural é o resultado de um integrado sistema de forças.

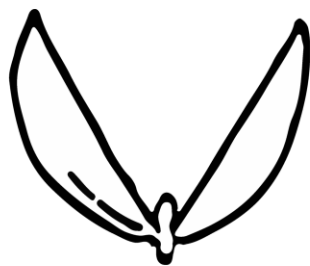
A Natureza viva compreende uma abundância complexa de formas que resultam de múltiplas forças internas e externas que geram o seu metabolismo, reprodução, crescimento e recetividade em diversas escalas temporais e dimensionais.

Uma compreensão profunda sobre as forças e funções dos fenómenos naturais (orgânicos e inorgânicos) também pode influir na maneira de conceber o nosso habitat: ao invés da arquitetura surgir isolada, ela pode ser consequência da direta influência das forças do Ser, do material e do ambiente que a rodeiam.

Como gerar uma arquitetura que resulte das forças internas e externas que a motivam?

³ “É a lei perene de todas as coisas orgânicas e inorgânicas, de todas as coisas físicas e metafísicas, de todas as coisas humanas e sobre-humanas, de todas as manifestações verdadeiras da mente, do coração e da alma, que a vida é reconhecível na sua expressão, a forma segue sempre a função. Esta é a lei.” Sullivan L. em “The Tall Office Building Artistically Considered. Lippincott's Magazine” (1896).

⁴ Em “The Power of Movement in Plants” (1880) Darwin C. demonstra algumas das forças essenciais para o crescimento das plantas.



THE GERM: THE SEAT OF POWER

Above is drawn a diagram of a typical seed with two cotyledons. The cotyledons are specialized rudimentary leaves containing a supply of nourishment sufficient for the initial stage of the development of the germ.

The Germ is the real thing; the seat of identity. Within its delicate mechanism lies the will to power: the function which is to seek and eventually to find its full expression in form.

The seat of power and the will to live constitute the simple working idea upon which all that follows is based—as to efflorescence.

Fig. 2 - “O germe: A base de poder - Acima foi desenhado um diagrama de uma semente típica com dois cotilédones. Os cotilédones são folhas rudimentares especializadas que contêm um suprimento de alimento suficiente para o estágio inicial do desenvolvimento do germe. O germe é a essência; a base da identidade. Dentro do seu delicado mecanismo reside a vontade de poder: a função que é procurar e eventualmente encontrar a sua plena expressão na forma. A base do poder e a vontade de viver constituem a ideia simples sobre a qual tudo o que se segue é baseado - quanto à eflorescência.” Sullivan L. em “The Germ: The Seat of Power, A System of Architectural Ornament According with a Philosophy of Man's Powers” (1924).

0.1.3 Harmonia entre as formas e as forças

“La Bellezza è la somma di tutte le parti messe insieme, in maniera tale che non è necessario aggiungere, né togliere, né alterare niente.”

Leon Battista Alberti ⁵

Uma estrutura eficiente frui de uma harmonia entre a sua forma, forças e materiais, e esta está intimamente relacionada à contemplação da sua beleza. A minimização do material e peso (economia de meios), a minimização de desvios ou movimentos ativos (estabilidade estrutural) e a maximização da rigidez (resistência à deformação) são resultado de uma relação consonante entre os diversos elementos, “de tal forma que nada pode ser acrescentado, tirado ou alterado” sem grandemente prejudicar a sua ordem estrutural.

Esta “simbiose” entre os elementos da estrutura envolve o uso de um sistema holístico no processo de concepção e construção, um sistema que incite uma unidade entre as partes e o todo. Tal como um ser vivo, a deformação de um elemento gera uma reação em cadeia que influencia o todo - ou a estrutura adequa o seu funcionamento e encontra um novo estado de equilíbrio, ou a sua ordem se desmorona.⁶

Independentemente do tipo de sistema que se pretende criar (seja ele comprimido, tracionado ou composto) é essencial encontrar esta harmonia. Dela, podem resultar soluções arquitetónicas surpreendentes que respondem a problemas aparentemente transversais à estrutura, como: a proteção ambiental, a conservação do património, a sustentabilidade económica, a autonomia local... e, porventura, a concepção de uma arquitetura mais bela e natural.

Como criar uma harmonia estrutural entre a forma, as forças e os materiais?

⁵ “A Beleza é a soma de todas as partes reunidas, de tal forma que não é necessário acrescentar, tirar ou alterar nada”. Alberti L. em “De re aedificatoria” (1452).

⁶ Esta permanente regulação de um sistema é chamada homeostase. No caso da estrutura dos animais vertebrados, a adequação dos ossos (que resistem essencialmente à compressão) e dos músculos e tendões (que resistem essencialmente à tração) procura a manutenção de uma integridade tensional dinâmica simétrica. É através da adaptação que é possível uma deformação constante por um renovado estado de equilíbrio.

0.1.4 Proteção Ambiental

“Our age requires buildings that are lighter, more energy-saving, more mobile and more adaptable, in brief more natural buildings, without disregarding the need for safety and security.”

Frei Otto e Bodo Rasch ⁷

A população é cada vez maior e polui cada vez mais: mais recursos, energia e desperdício; mais petróleo, água e terra; mais plantas, animais e ecossistemas... é preciso fazer com menos.

A limitação da nossa percepção não permite compreender as implicações das ações da humanidade. Por esse motivo, há quem resista com tanto ceticismo aos sinais do seu impacto. Contudo, a comunidade científica confirma a existência de alterações no clima, fauna e flora; alterações que, em grande medida, são decorrentes de atividades humanas - entre elas, a construção.

Estimativas genéricas indicam que a construção é responsável pelo consumo de 45% da energia utilizada, 40% da água potável, 70% da madeira e 50% das emissões do dióxido de carbono e outros compostos orgânicos voláteis (COV). A construção absorve cerca de 50% dos recursos extraídos e é a atividade que mais resíduos gera.⁸

Tendo em conta o previsto crescimento da população mundial, os problemas ambientais provocados pela poluição humana serão proporcionalmente maiores.⁹

A consciência do/a arquiteto/a sobre a sua responsabilidade incita uma questão ética fundamental: como é que a arquitetura pode regenerar o equilíbrio entre o homem e o meio ambiente?

⁷ “A nossa era exige edifícios mais leves, mais económicos, mais móveis e adaptáveis, em resumo edifícios mais naturais, sem desconsiderar a necessidade de segurança.” Otto F. e Rasch B. “Finding Form” (2001).

⁸ Dobbs R. em “Urban World: Mapping the Economic Power of Cities. New York: McKinsey Global Institute” (2011).

⁹ Segundo estimativas da ONU, o número de habitantes em 2050, atingirá os 9,2 bilhões.

0.1.5 Recursos Locais

“We have to rely on the materials we have and can afford to have, on our labour, on our own hands, on what we find under our feet. Nature itself has provided the solution.”

Hassan Fathy ¹⁰

Antes da revolução industrial e da globalização, a arquitetura era criada através dos recursos e conhecimentos locais. Por isso, era uma arquitetura cuja forma estava naturalmente ligada à cultura, ao material e à paisagem: é impossível dissociarmos os tipis, do cone, do couro, dos prados e das populações nômadas da América do Norte; ou os iglus, da cúpula, do gelo, do polo norte e da nação indígena esquimó; ou as casas escavadas, da pedra, das montanhas e das comunidades trogloditas da Capadócia...

A conexão simbólica entre os arquétipos locais, as topologias geométricas, os materiais, as paisagens e as comunidades é a fundação da identidade arquitetônica de um lugar ao longo do tempo. Esta percepção permite compreender a importância da preservação do patrimônio.

A maioria do legado arquitetônico é formado por materiais que resultam diretamente do modo de subsistência das populações. As populações nômadas, devido ao tipo de atividade de subsistência (a caça, a pastorícia ou o comércio), necessitam de se movimentar após um curto período temporal. Esta breve estadia requer uma construção efêmera, rápida e transportável (como a tenda, o yurt ou a tipi), uma construção composta essencialmente por materiais que resistem à tração (o tecido).

Contudo, a mudança da atividade de subsistência para a agricultura permitiu a sedentarização e a criação de uma arquitetura duradoura constituída por materiais rígidos, estáveis e pesados. É o exemplo da pedra, da terra e do betão, materiais que resistem essencialmente à compressão.

¹⁰ “Temos que confiar nos materiais que temos e podemos ter, no nosso trabalho, nas nossas próprias mãos, naquilo que encontramos sob os nossos pés. A natureza providenciou-nos a solução.” Fathy H. no discurso de aceitação do “The Right Livelihood Award” (1980)

A utilização destes materiais possibilitou o crescimento das comunidades em aldeias e das aldeias em cidades, e deste crescimento consolidaram-se inúmeras evoluções comportamentais no Homem enquanto indivíduo e sociedade.

Deste modo, o conhecimento do funcionamento de estruturas tracionadas e comprimidas é fundamental para a preservação e reabilitação do património humano. Além de permitir a preservação do passado, este conhecimento pode incitar o desenvolvimento de estratégias para o futuro, tanto na reabilitação evolutiva (com ou no património existente) como na construção de uma arquitetura integrada com o lugar.

Como é que a arquitetura pode conectar o homem com a Natureza que o envolve?

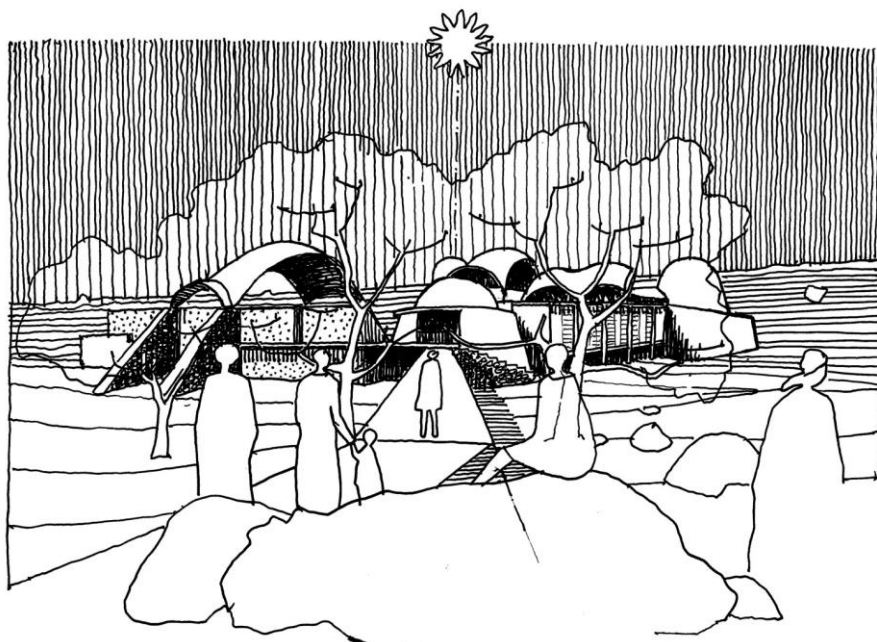


Fig. 3 – Desenho do Centro Interpretativo de Mapungubwe de Peter Rich (2011).

0.2 Objetivos

O reconhecimento destes desafios expõe uma questão: como criar estruturas eficientes, leves, harmoniosas e mais naturais?

Existem várias estruturas que poderiam ser exploradas. Contudo, é necessário restringir os objetivos. A seguinte investigação é sobre diferentes processos de conceção e construção de estruturas que resistem essencialmente a esforços axiais de compressão – as Estruturas Antifuniculares.

Deste modo, a investigação envolverá:

1 – A reflexão sobre os princípios qualitativos do comportamento estático de estruturas comprimidas;

2 – A pesquisa sobre os diferentes processos de procura da forma, e o seu desenvolvimento construtivo ao longo do tempo. ¹¹

3 – A realização de modelos físicos e digitais que demonstrem as qualidades espaciais e aplicações dos diferentes métodos de conceção de estruturas antifuniculares.

4 – A captação das quatro dimensões dos modelos criados para o ambiente digital – a altitude, latitude e longitude ao longo do tempo.

¹¹ Ao longo da dissertação, o termo “procura da forma” é utilizado em referência ao termo “*form-finding*”. Os processos de *form-finding* são métodos cuja conceção da forma é o resultado de sistemas de forças naturais. Através destes, o arquiteto incita a conceção aproveitando as características tectónicas dos materiais que utiliza.

Parte I

1. A Forma das Forças

1.1 O método científico e o tradicional

Como desenhar uma estrutura comprimida que resulte das forças que a condicionam? Existem duas abordagens distintas que procuram responder a esta questão: o processo clássico (tradicional) e o processo funicular (científico).

O processo clássico é baseado em normas, proporções e intuições geométricas geradas por instrumentos euclidianos, a régua e o compasso. Por incrível que pareça a grande maioria dos estilos arquitetónicos (antigos e atuais) são baseados nestas duas ferramentas. A partir delas, perceberam-se conceitos fundamentais que permitiram desenvolver algumas das mais desafiadoras estruturas existentes. Contudo, apesar das formas poderem-se aproximar do fluxo das forças, elas não são diretamente concebidas a partir dele.¹² Ao contrário desta abordagem, os processos funiculares permitem a análise, dimensionamento e formação de estruturas a partir do seu fluxo de forças.

O presente capítulo fará um preâmbulo sobre alguns dos princípios da teoria moderna de estruturas partindo de noções estáticas basilares, para a conceção de diagramas gráficos bidimensionais e, seguidamente, para os primeiros modelos físicos de análise funiculares.

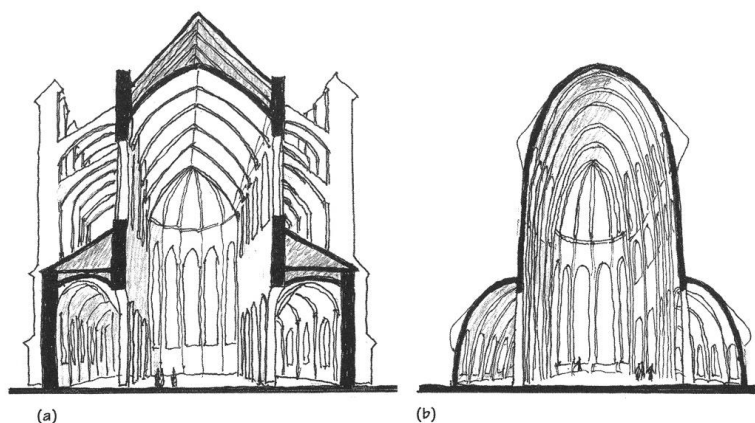


Fig. 4 - Os dois edifícios são compostos por famílias geométricas distintas: a clássica (a) e a funicular (b). Apesar de conterem o mesmo espaço interior, a estrutura funicular não necessita de tanto material para que as forças fluam ao longo da sua secção. (J. Ochsendorf, P. Block)

¹² Em “Arcos, bóvedas e cúpulas: Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica” (2004) Huerta S. faz uma análise comparativa entre os processos de conceção tradicionais e científicos, examinando a validade das regras antigas à luz da teoria moderna de estruturas.

1.2 O equilíbrio de um arco

“Arco non è altro che una fortezza causata da due debolezze (...).”

Leonardo Da Vinci ¹³

O arco é o arquétipo das estruturas comprimidas. A sua invenção e a sucessiva transformação tridimensional em abóbadas e cúpulas foram uma revolução na História da arquitetura. A partir dele, tornou-se possível a expansão dos vãos, a entrada de luz natural e a conceção de todo um novo sistema de relações espaciais. O entendimento do seu funcionamento é fundamental.

Para a estabilidade de um arco de alvenaria é necessário que os esforços exercidos se situem no seu interior (esforços axiais). Estes, são transportados a partir da pedra central (chave) para as duas metades do arco em sentidos opostos. Através da reação dos apoios gera-se compressão, ou seja, a pressão exercida tende a aproximar a matéria. Estes esforços podem ser “decompostos” em forças verticais opostas (a força da gravidade e a força contrária dos apoios) e forças horizontais opostas (o impulso horizontal e o impulso contrário dos apoios). O equilíbrio depende da simetria das forças.

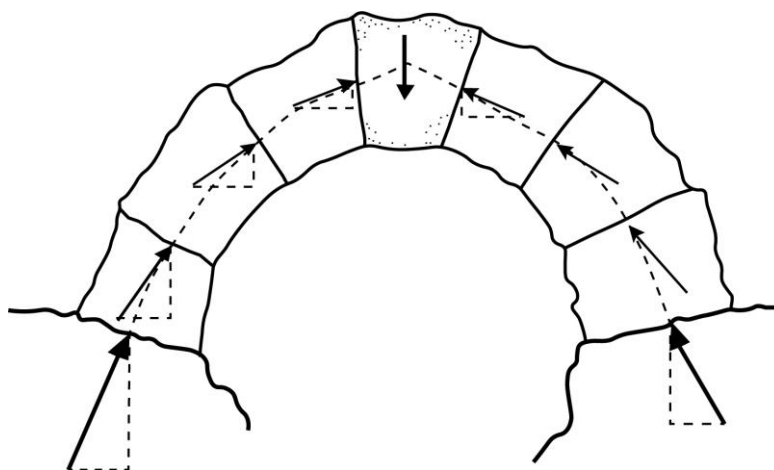


Fig. 5 – Cada aduela está em equilíbrio devido à compressão exercida pelas aduelas adjacentes (cópia de Durm).

¹³ “O Arco não é mais que uma fortaleza causada por duas fraquezas (...).” Vinci L. conforme citado por Bruschi A. em “Scritti rinascimentali di architettura” (1978).

1.3 Linha de Pressão

Quer na geração da forma como na seleção dos materiais, a criação de estruturas comprimidas e tracionadas requer a compreensão da ação das forças. Apesar das diferenças construtivas, visuais e táteis, a estabilidade das estruturas com materiais que resistem essencialmente à compressão (o tijolo, a pedra e o betão) depende de formas similares, formas que não produzam trações.

Devido a estas características tectónicas, a estabilidade destas estruturas depende da ausência de esforços transversos críticos, pois estes geram flexões e sucessivas trações (ver Fig.6). Desta maneira, é fundamental assegurar que a forma encaminhe os esforços ao longo da secção da estrutura (esforços axiais).

Existem várias linhas de pressão¹⁴ que permitem a estabilidade de uma dada construção e cada uma percorre um caminho que não é necessariamente análogo à forma do intradorso ou extradorso da sua estrutura, mas às diferentes cargas nela exercidas (como as cargas permanentes do seu peso próprio, cargas impostas pelas pessoas e mobiliário, ou outras cargas variáveis como a neve e o vento).

Isto significa que as linhas de pressão percorrem caminhos que mudam consoante os diferentes esforços impostos ao longo do tempo.

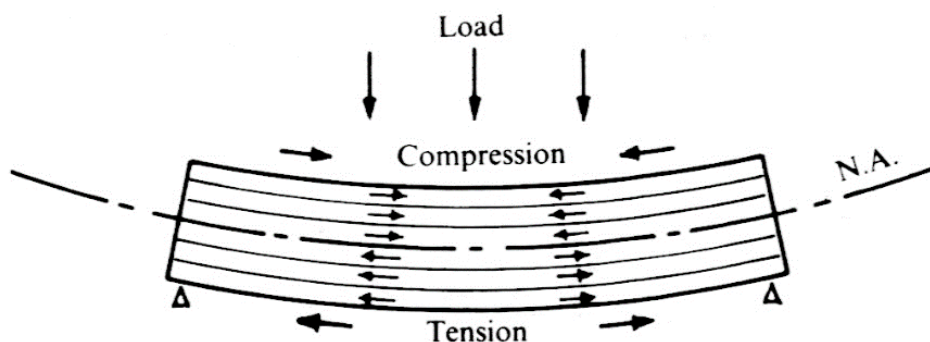


Fig. 6 - Flexão gerada por uma carga transversal à estrutura. No caso, a flexão gera compressão na parte superior e tração na parte inferior. O eixo central é neutro.

¹⁴ Denominação do fluxo percorrido pelas forças.

A ideia da linha de pressão foi intuída muito antes do desenvolvimento da mecânica estrutural. Contudo, a sua aplicação estava condicionada aos métodos e ferramentas euclidianas.¹⁵ Nos subcapítulos seguintes, serão abordados diferentes métodos gráficos e físicos de determinação das linhas de pressão que permitem a análise e a conceção de estruturas comprimidas e tracionadas. Eles são baseados em dois métodos fundamentais: nos polígonos funiculares gráficos e nos modelos funiculares físicos.

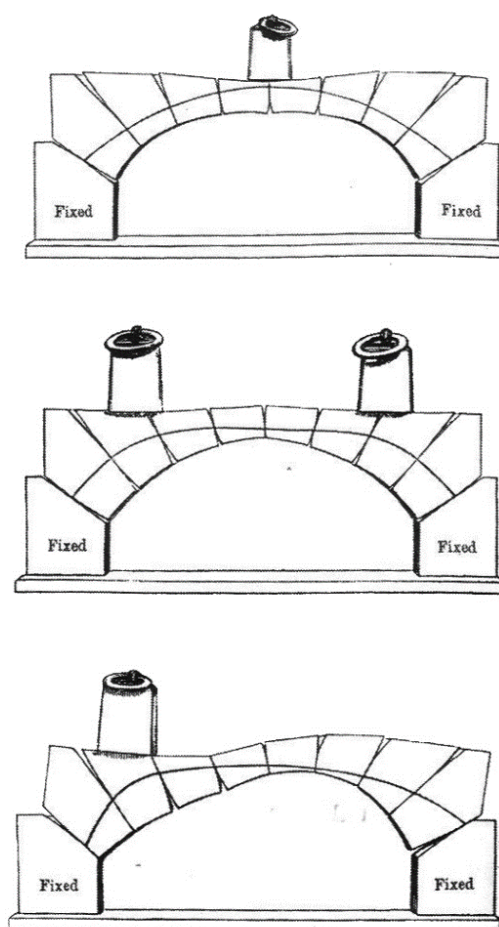


Fig. 7 - Idealizado por William Barlow (1812-1902) e adaptado por Fleeming Jenkin (1833-1885) o modelo do arco é composto por aduelas com faces curvas que se contactam em um só ponto. Do conjunto de pontos de contacto é possível desenhar uma linha, a linha de pressão. Através da adição de uma ou mais cargas verifica-se a adaptação da estrutura e da linha de pressão às novas condições de equilíbrio. Ewing A. desenhou o modelo de Jenkin F. em “The strength of materials” (1899).

¹⁵ Um passo importante para o início da investigação científica sobre a linha de pressão, foi a investigação de Simon Stevin (1548-1602). Entre as suas descobertas, Stevin expôs conceitos gráficos elementares como a lei do paralelogramo de vetores e a ideia de que o equilíbrio de uma corda, com cargas aplicadas, poderia ser descrito com polígonos de forças. O teorema da composição de forças foi formalmente apresentado por Stevin S. em “De Beghinselen der Weeghconst” (1586).

1.4 A 2ª Lei de Hooke

Para a análise e concepção de estruturas comprimidas polifunculares é essencial a compreensão da 2ª Lei de Hooke. Em 1675, Robert Hooke (1635-1703) resumiu numa frase a verdadeira forma de equilíbrio de um arco, “ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum”, que traduzida significa: “como pende a linha flexível, assim invertido será o arco rígido”. Por outras palavras Robert Hooke descobriu que a forma invertida de um fio que suporta determinados pesos em tração (funicular), é a forma ideal do arco que suporta o mesmo peso em compressão (antifuncular).¹⁶

Apesar de Hooke nunca ter descoberto a equação que formula a catenária (arco ideal de uma corda que suporta um peso igualmente distribuído)¹⁷ ele determinou numa frase o princípio fundamental que permite a descoberta da forma de estruturas comprimidas ou tracionadas através de processos físicos – o princípio da inversão dos esforços.

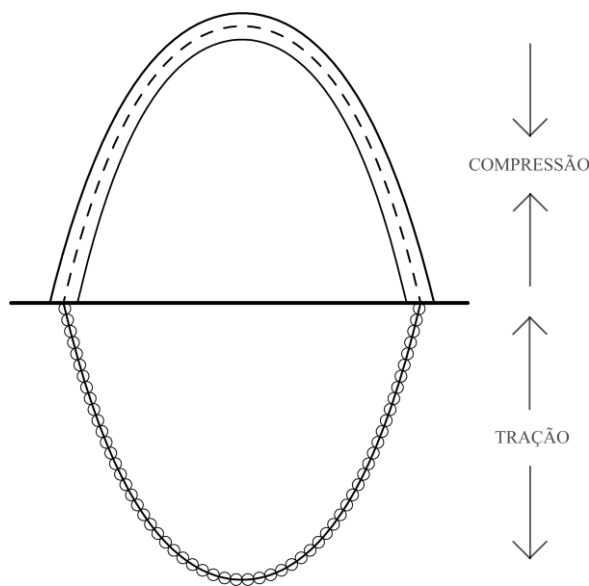


Fig. 8 - Ilustração do princípio da inversão das forças (cópia duma ilustração de Poleni G.).

¹⁶ Hooke R. expôs a descoberta em 1675 no ensaio “A description of helioscopes and some other instruments made by Robert Hooke, Fellow of the Royal Society”. Esta estava escrita em anagrama (“abcccddeeeefggiiiiiiiill mmmmmnnnnnooprssstttttuuuuuuux”) para que não fosse observada ou copiada. O anagrama foi decodificado após a sua morte pelo testamentário e publicada pelo secretário da Royal Society, Richard Waller (1705).

¹⁷ A equação da catenária foi exposta em 1691 por Leibniz G., Huygens C., e Bernoulli J. em resposta a um desafio lançado por Bernoulli J.

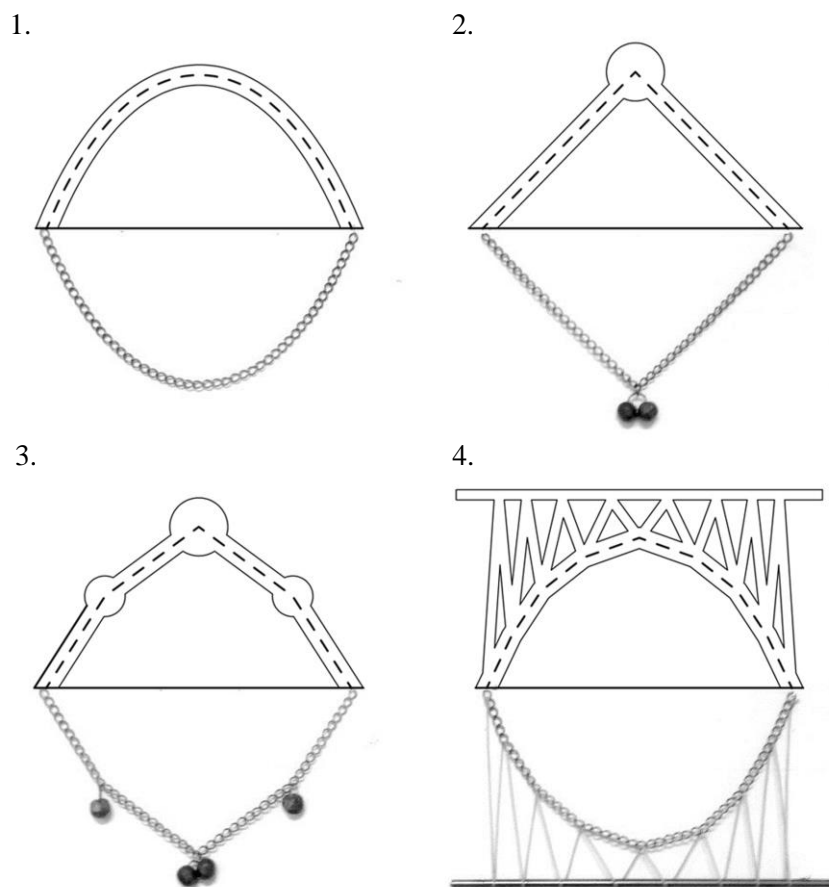


Fig. 9 - Quatro hipóteses de funiculares com os respectivos antifuniculares. O primeiro arco é formado por cargas uniformemente distribuídas (catenária); o segundo tem uma carga pontual central; o terceiro possui várias cargas pontuais (as cargas pontuais do segundo e do terceiro arco anulam a influência do peso próprio da corrente na forma); e o quarto arco possui pesos que diminuem progressivamente à medida que o braço aumenta (parábola) (do autor).

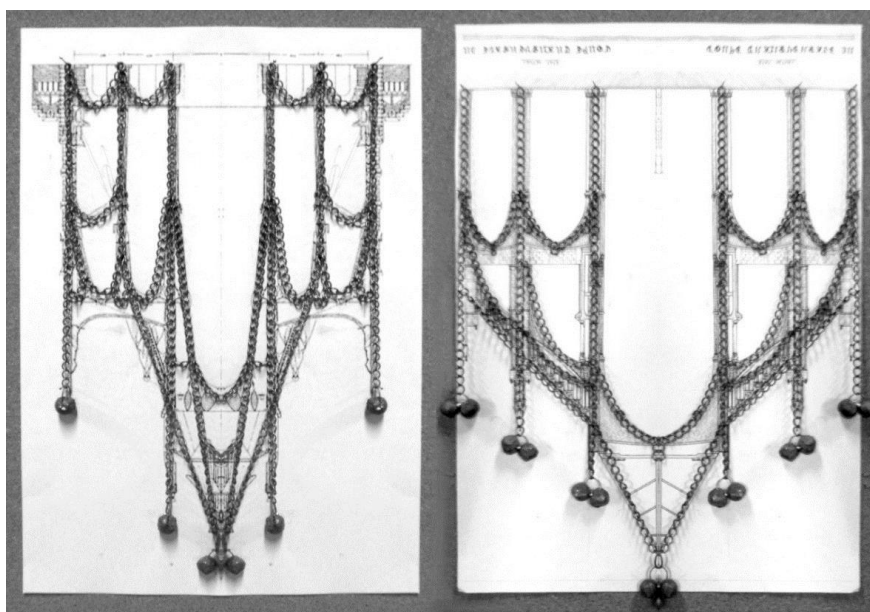


Fig. 10 - Modelos funiculares sobre os cortes transversais do Templo Expiatório da Sagrada Família (à esquerda) e da Catedral de Amiens (à direita). Os modelos representam os diferentes pesos e proporções que definem as linhas de pressão que atravessam a secção das estruturas (do autor).

1.5 Polígonos funiculares

A determinação das inúmeras possibilidades de linhas de pressão em estruturas bidimensionais também pode ser feita através do método gráfico funicular.

Através da Fig. 8 é possível compreender o processo: a composição da linha de pressão, que corresponde ao polígono funicular das cargas (ACDPQB), parte do polígono de forças (em cima) que, por sua vez, advém do conjunto de cargas (K, L, M, N); depois as diferentes cargas são transpostas em vetores colocados por ordem (EF, FG, GH, HR); em seguida, é escolhido o posicionamento do polo (S) cuja o lugar terá influência direta no resultado final pois, a partir dele, traçam-se os raios polares que, pela mesma ordem, sentido e direção, formam o polígono funicular (ES corresponde a AC, FS a CD, GS a DP, etc.).

Isto significa que, apesar da existência de pesos específicos, existem infinitas possibilidades de equilíbrio (mudando a localização do polo é possível traçar outros polígonos funiculares). O processo também funciona de forma inversa. Em vez da descoberta de um conjunto de soluções geométricas a partir de um sistema de forças, é possível descobrir o sistema de forças adequado a uma determinada solução geométrica.

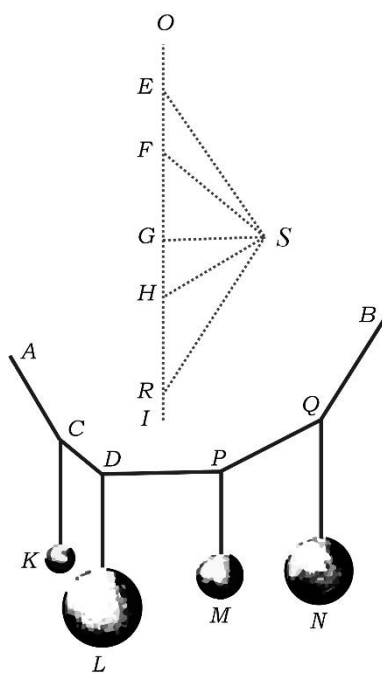


Fig. 11 – Cópia de um diagrama da “Nouvelle Méchanique ou Statique” (1725) de Varignon P.

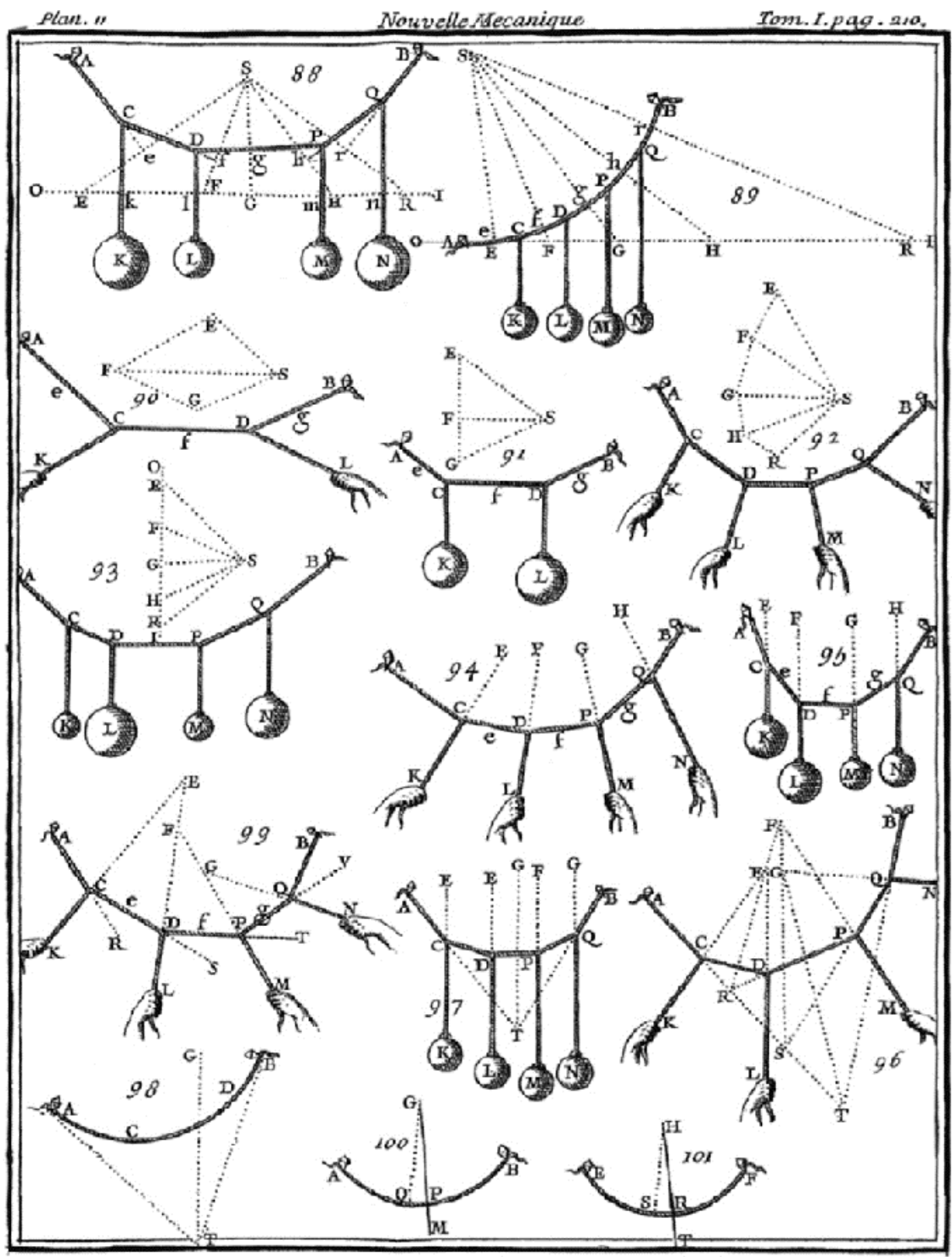


Fig. 12 – Polígonos funiculares com os respectivos polígonos de forças. Da “Nouvelle Mécanique ou Statique” (1725) de Varignon P.

Sumarizando, existem dois processos essenciais para a descoberta da linha de pressão de um arco: o processo gráfico (polígono funicular) e o processo físico (com uma corda suspensa). Os resultados são absolutamente idênticos.

Apesar da correspondência, a descoberta da solução funicular através do método gráfico requer a construção de um diagrama de forças. Isto significa que a sua manipulação é indireta e exige um conhecimento sobre as diferentes operações gráficas. Além disso, este torna-se extremamente abstrato na geração de estruturas tridimensionais.

Por outro lado o método físico é direto. Basta suspender uma corda, rede ou tecido, aumentar ou diminuir as suas cargas e alterar as posições dos diferentes apoios, para gerar distintas soluções funiculares bidimensionais ou tridimensionais.

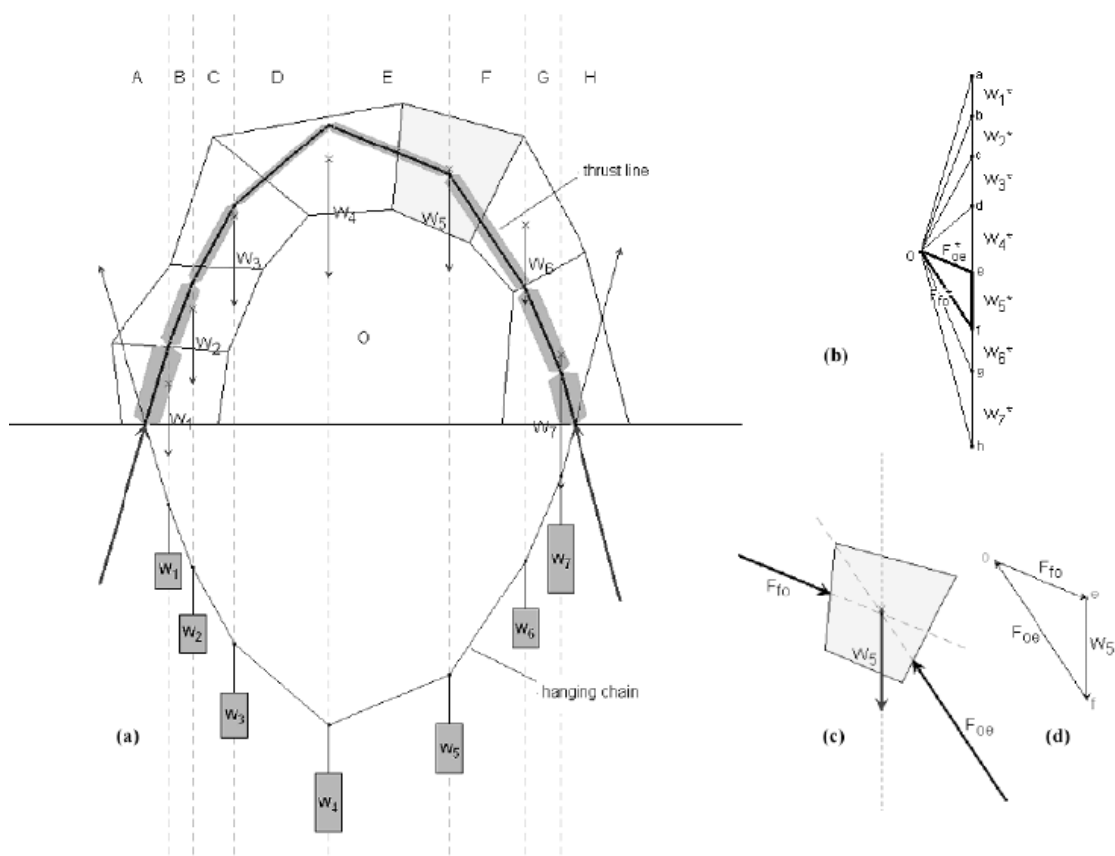


Fig. 13 - Possível linha de pressão de um arco composto por aduelas de diferentes cargas. A linha pode ser descoberta através do método gráfico (polígono funicular) e do método físico (corda suspensa). Do artigo "As hangs the flexible line" de Block P., DeJong M. e Ochsendorf J. (2006).

1.6 Ensaio de Barlow

Em 1846 o engenheiro William Barlow (1812-1902) publicou uma série de ensaios que demonstram com clareza as propriedades das linhas de pressão em estruturas comprimidas.¹⁸ Entre estes, à um particularmente útil para compreender o conceito.

O ensaio é composto por um arco de seis aduelas conectadas por juntas de madeira. Utilizando uma corda suspensa, Barlow desenhou três linhas de pressão: a linha de pressão com impulso horizontal mínimo (a), médio (b) e máximo (c). É importante enfatizar que além destas linhas, existem muitas outras dentro do arco que permitem o seu equilíbrio.

Para testar a sua estabilidade Barlow retirou, em cada caso, todas as tábuas das juntas por onde a linha de pressão não passava. Ao verificar que a forma do arco permanecera em equilíbrio, constatou que: existem várias linhas de pressão possíveis ao longo da secção de um arco; para manter o equilíbrio do arco é necessário a existência de pelo menos uma linha de pressão ao longo do seu eixo; e que é possível diminuir a secção do arco desde que esta contenha em si a linha de pressão.¹⁹



Fig. 14 – Modelo de Barlow W. com a linha de pressão a tracejado.

¹⁸ Barlow W. “On the existence (practically) of the line of equal horizontal thrust in arches, and the mode of determining it by geometrical construction” (1846).

¹⁹ Idealmente, a linha de pressão deve situar-se no núcleo central de inércia do arco para impedir trações na sua secção. O núcleo central de inércia é o lugar geométrico da secção normal do membro estrutural onde qualquer tensão nele aplicado será distribuída por toda a sua área.

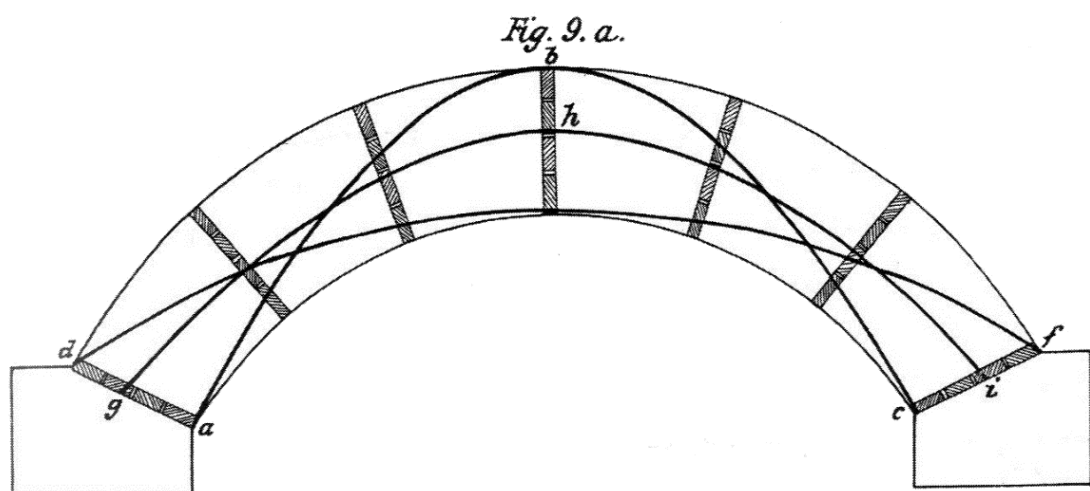
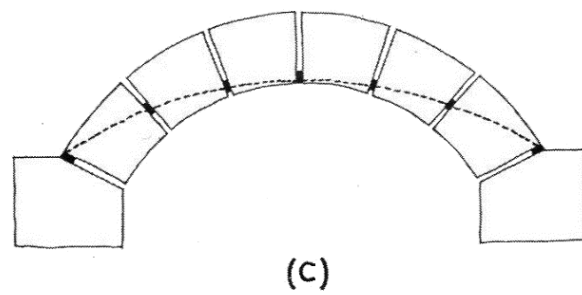
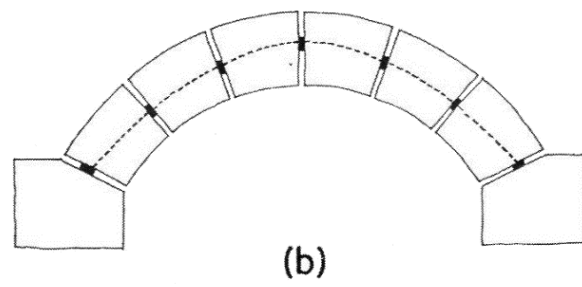
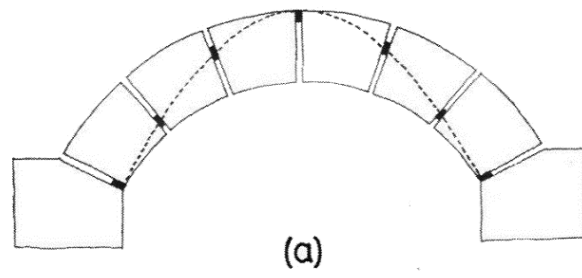


Fig. 15 - Ilustração do ensaio de Barlow W. (1846).

1.7 Contrafortes

Apesar da linha de pressão ser contínua, a criação de estruturas é muitas vezes entendida pela soma das suas partes (arcos, arcobotantes, pilares, contrafortes, vigas, etc.). Esta decomposição cartesiana é prática na medida em que permite compreender as funções estruturais de cada “elemento”.²⁰

Nas catedrais românicas e góticas o contraforte é um elemento claramente distinto. A sua função é garantir, através do seu dimensionamento, carga e configuração, que os impulsos horizontais não provoquem esforços transversos críticos e possíveis deslizamentos.

Os construtores românicos geriram os impulsos horizontais de forma literal, alargando o contraforte. Contudo, além de dispendiosa, esta solução criava edifícios mais pesados, insalubres e sombrios. Os construtores góticos, por outro lado, resolveram o problema com mais elegância. Ao invés de aumentarem a espessura para orientar a linha de pressão para o núcleo central de inércia do contraforte, eles aumentaram simplesmente a carga vertical com pináculos (imagem (c) e (d)).

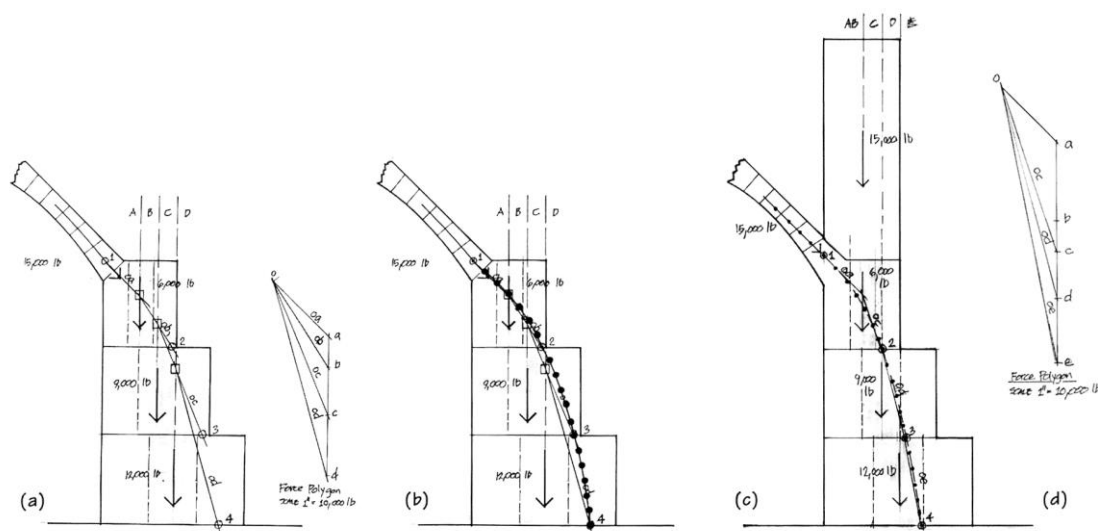


Fig. 16 - À direita, a carga vertical adicionada estabiliza a estrutura mantendo a linha de pressão no núcleo central do contraforte. Do livro “Form and Forces”(2008) de Allen E. and Zalewski W.

²⁰ Descartes R. no “Discours de la méthode” (1637) propõe que o método científico deve partir da decomposição e análise das diferentes partes de um prefixo que se julgue verdadeiro. Apesar de, em certas circunstâncias, este método ser prático, é impossível compreender qualquer sistema holístico através da simples soma das suas partes.

A Fig. 15 representa a análise de equilíbrio da catedral de Palma de Maiorca. Através desta secção é possível entender o fluxo das forças e a função estrutural dos vários elementos da catedral gótica.

Simplificando, a estrutura é composta por arcos em ogiva, que formam abóbadas cruzadas. Estes transportam o seu impulso vertical para as colunas e o impulso horizontal para os arcobotantes que, por sua vez, transmitem-no para os contrafortes. Para orientar a linha de pressão para as colunas e contrafortes sem abdicar da sua esbelteza é acrescentada a carga vertical dos pináculos.

Este sistema possibilitou a construção de catedrais mais altas, largas e esbeltas e, simultaneamente, a difusão de mais luz natural.

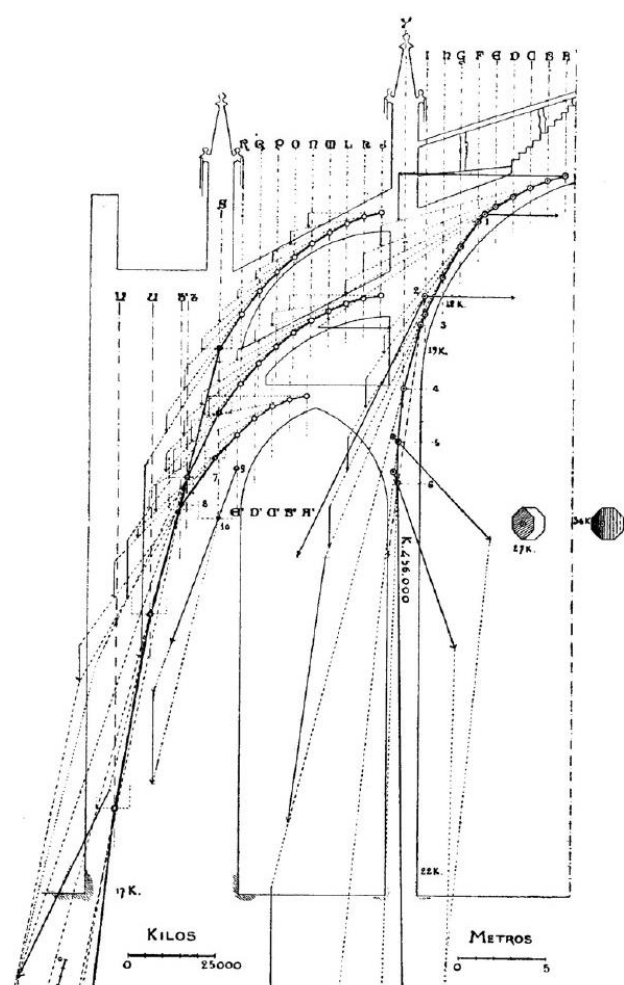


Fig. 17 - Análise de equilíbrio da Catedral de Palma de Maiorca através de polígonos funiculares. (Rubió.J.).

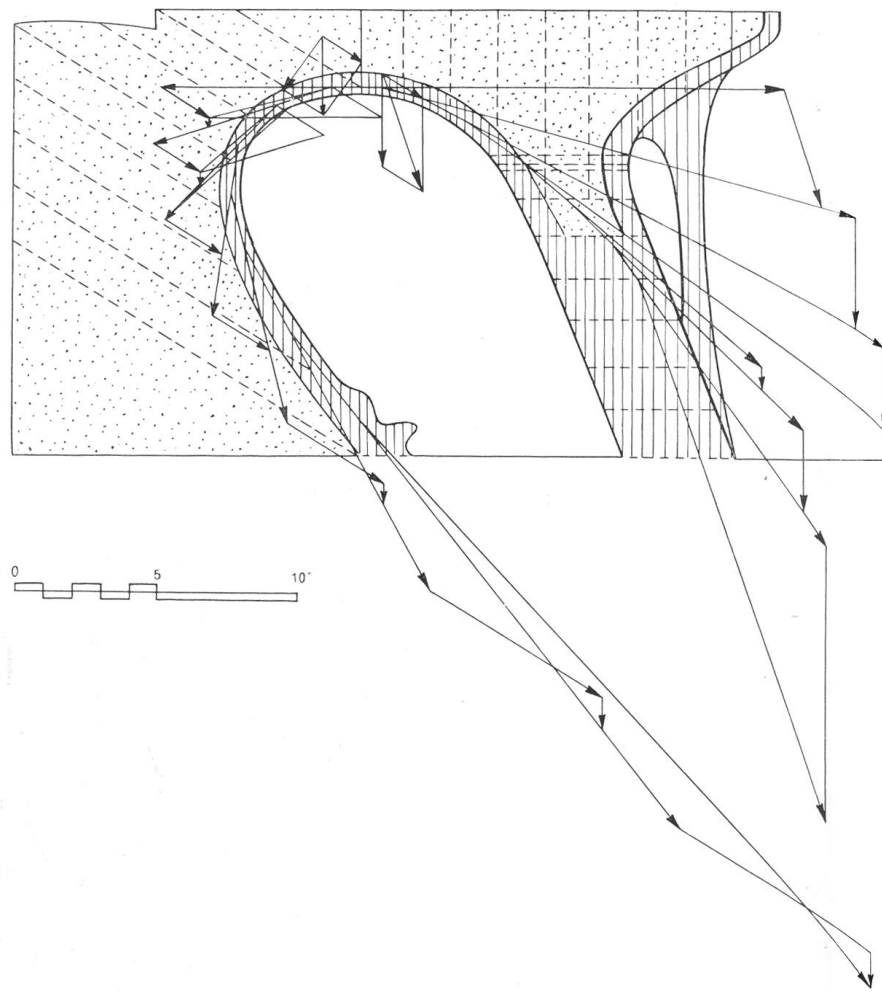


Fig. 18 - Cópia de um desenho de Gaudí A. que demonstra o processo gráfico de concepção das abóbadas do Parque Guell. As abóbadas inclinadas do Parque Guell foram concebidas com polígonos funiculares que compreendem as cargas verticais do seu próprio peso e os impulsos horizontais exercidos pelo terreno. Utilizando o mesmo princípio do pináculo gótico, a condução da linha de pressão para as fundações é feita através da carga vertical imposta pela coluna.

Os exemplos tratados até ao momento partiram da suposição que as forças impostas são permanentes e verticais, isto porque a gravidade é constante. Contudo, existem outras ações que, em certas circunstâncias, devem ser ponderadas: um terreno pode provocar impulsos horizontais à estrutura que o suporta; um terramoto pode incitar vibrações dinâmicas em diversas direções; e as pessoas, viaturas e mobiliário podem exercer cargas verticais variáveis... A consciência desta complexidade permite assegurar a estabilidade ao longo do tempo e, porventura, desencadear soluções estruturais particularmente harmoniosas e integradas.

1.8 Análise de segurança de edifícios alvenaria

De que há registo, a aplicação do princípio da inversão dos esforços foi aplicada pela primeira vez na Catedral de S. Paulo em Londres, desenhada por Christopher Wren (1632-1723) e analisada por Robert Hooke.

Durante o desenvolvimento do projeto, Hooke utilizou uma corda suspensa para determinar a linha de pressão da secção vertical da cúpula interior. De maneira simples e intuitiva, este método permitiu que Hooke e Wren encontrassem uma estrutura que permite a estabilidade da estrutura.

Apesar de ser formado pelas ferramentas e geometrias clássicas, ele é o primeiro exemplo de um edifício cuja conceção e análise também foi regida por geometrias funiculares.

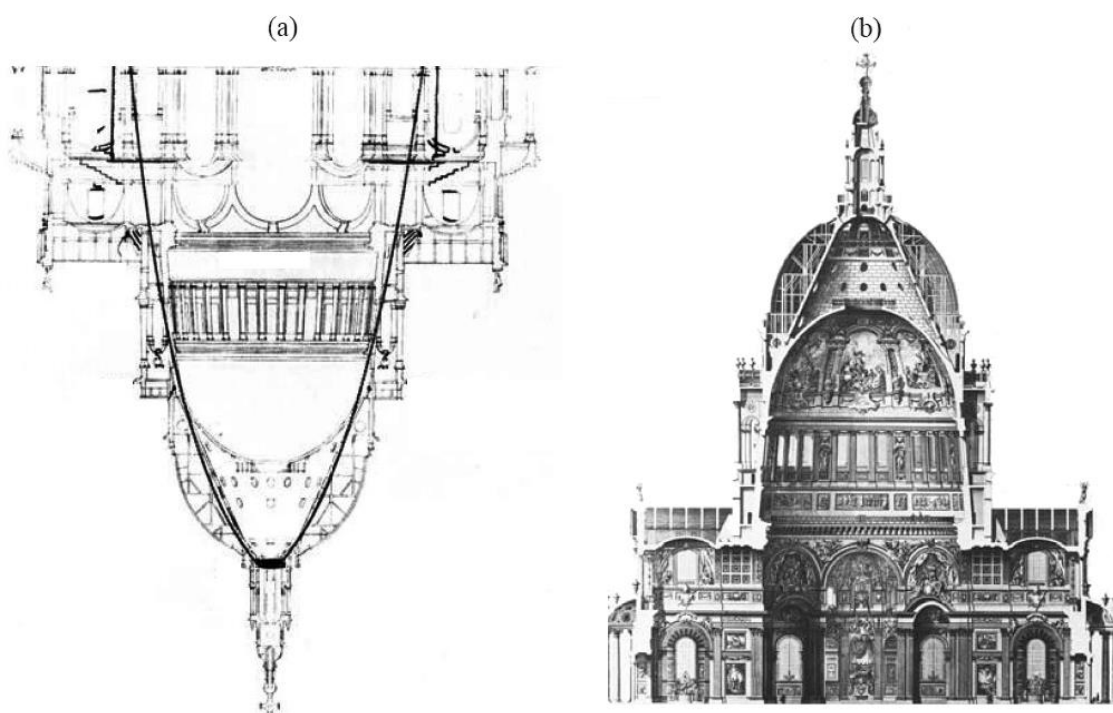


Fig. 19 - Catedral de S. Paulo em Londres de Wren C. (1720).

(a) Ilustração da linha de pressão descoberta através de uma corda suspensa (Addis, 2007).

(b) Desenho da secção arquitetónica. (Poley A., 1925).

Outro passo essencial para a aferição rigorosa da estabilidade de estruturas viria a ser desenvolvido vinte anos mais tarde por Giovanni Poleni (1683-1761). Em 1740, Poleni utilizou o mesmo método para avaliar a estabilidade da cúpula S. Pedro em Roma (que, na época, tinha fendas radiais alarmantes).

Para a aferição do equilíbrio estático da cúpula de 42m de diâmetro, Poleni utilizou dois processos, os cálculos estáticos e o modelo físico da corda suspensa de Hooke. Porém, ao contrário de Hooke, Poleni colocou na corda os diferentes pesos relativos às cargas de cada uma das frações da secção da cúpula.

Desta maneira concluiu que a linha de pressão estava contida no arco e que a cúpula estava em segurança (recomendendo apenas a adição de cintas para conter os impulsos horizontais dos anéis).

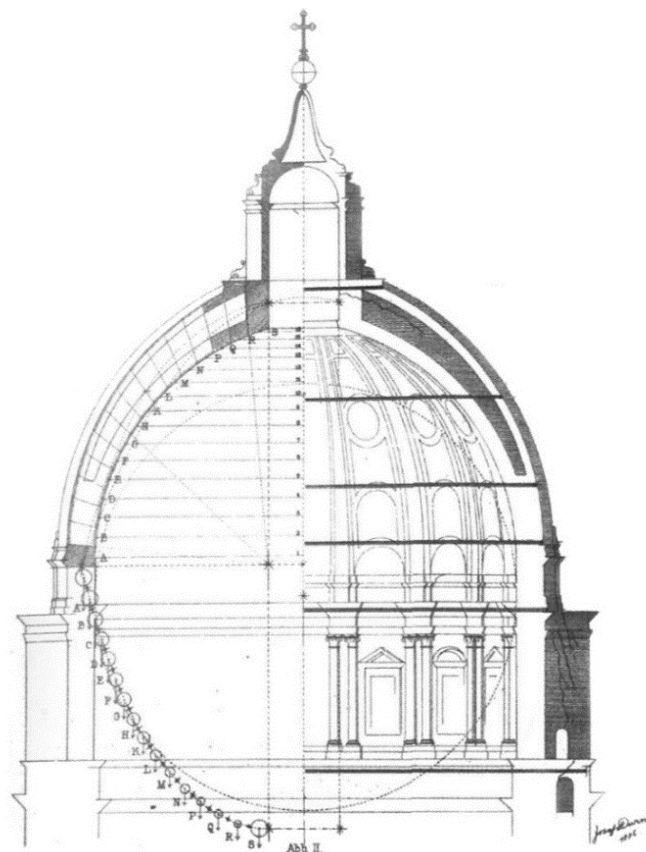


Fig. 20 - Desenho da secção da cúpula da Catedral de São Pedro e da corda com os pesos relativos. (Poleni G.).

Grande parte do património arquitetónico é formado por edifícios de alvenaria. Contudo, muitos destes têm estruturas cujo o equilíbrio estático ainda é insuficientemente compreendido.

A principal causa do colapso de estruturas de alvenaria não é pela falta de resistência do material à compressão e pelo sucessivo varejamento ou enfundamento, mas pelos movimentos causados por variações tectónicas das fundações, terremotos ou desgaste material.

Atualmente, a análise digital mais utilizada para a aferição da estabilidade e comportamento de estruturas é o Método dos Elementos Finitos. O MEF tem como objetivo a determinação do estado de tensão e deformação de uma estrutura sujeita a ações exteriores. Para proceder a esta, é necessário conhecer *á priori*: a forma, as características do material e as diferentes cargas aplicadas.

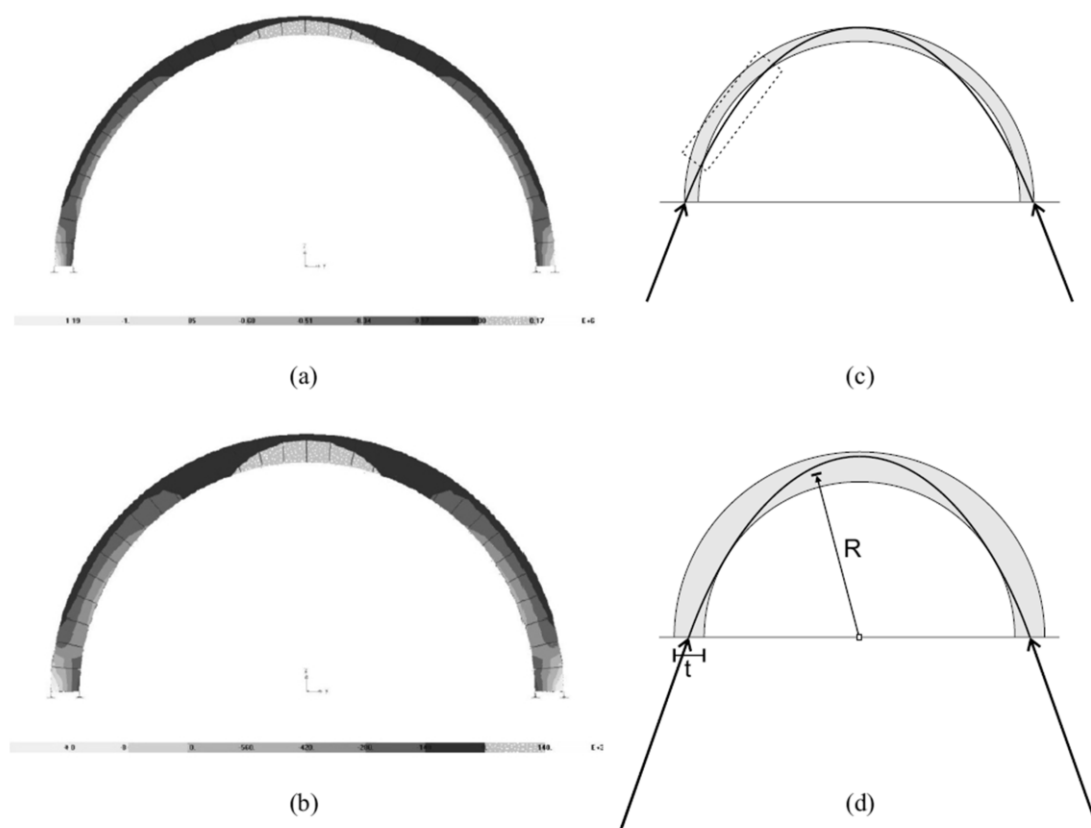
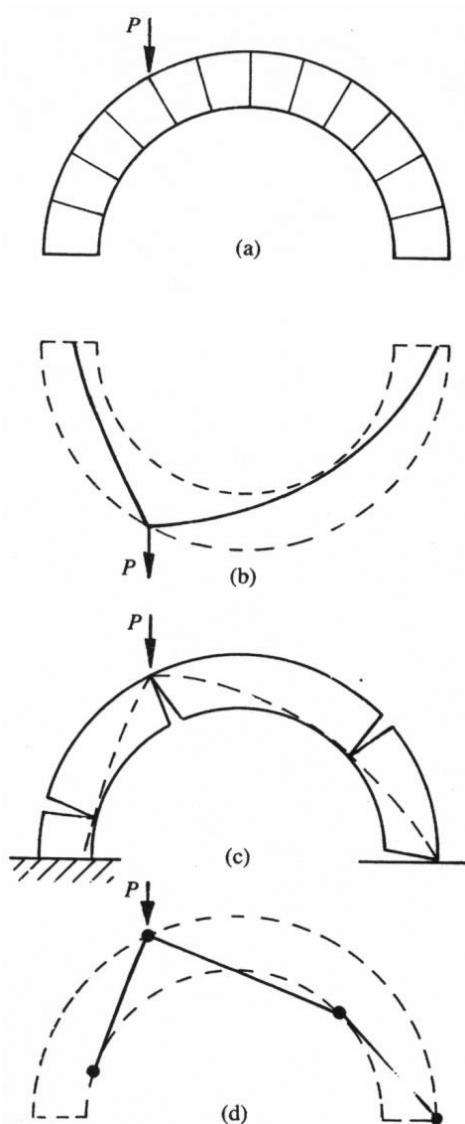


Fig. 21 - Comparação de dois arcos com secções distintas através da análise com o Método dos Elementos Finitos (a) e (b) e da análise com a linha de pressão (c) e (d). A razão de t/R do arco (a) e (c) é 0.08 e a de (b) e (d) é 0.16. (Block P.).

Com este método é possível determinar a distribuição e intensidade das forças ao longo da secção. Contudo, a análise também pode ser ambígua e difícil de interpretar. A Fig. 19 demonstra duas análises a dois pares de arcos de volta perfeita com secções distintas: a análise com o MEF (à esquerda) e a análise com a linha de pressão (à direita).

A análise adquirida através do MEF aos dois arcos é muito semelhante, sendo duvidosa a conclusão sobre a estabilidade das estruturas. Por outro lado, a análise feita através da linha de pressão revela a clara diferença entre os arcos: o primeiro é demasiado fino para conter a linha de pressão e produz excessivos esforços transversos, enquanto que o segundo contém ao longo da sua secção a linha de pressão e permaneceria em equilíbrio.



Como constatado, a análise com o MEF pode incitar dúvidas sobre a estabilidade da estrutura (problema ainda maior em estruturas tridimensionais). Todavia, um modelo bidimensional ou tridimensional de cordas com as cargas relativas permite colmatar as incertezas que possam subsistir após a análise do MEF.

Outro indício sobre a estabilidade de uma estrutura comprimida são as fendas e outras descontinuidades que ela possa ter (pois as forças não passam por elas). Por exclusão de partes, as fendas permitem deduzir a trajetória da linha de pressão e o hipotético movimento do mecanismo em colapso.²¹

Fig. 22 – Através de um cabo suspenso esta ilustração demonstra a deformação provocada por uma carga pontual na linha de pressão de um arco. Quanto maior a carga, maior a deformação da linha. Caso a deformação da linha seja demasiado incoerente com a forma da estrutura geram-se diferentes articulações (fendas) e um hipotético mecanismo de colapso. (Heyman J.).

²¹ No “Essai sur une application des regles de Maximis & Minimis a quelques Problemes de Statique, relatifs a l'Architecture” (1773), Coulomb C. (1736-1806) demonstra a localização da junta de rotura de um arco através do método dos máximos e mínimos.

Parte II

2. Modelos físicos

2.1 A terceira dimensão

“Galileo’s law [square-cube law] applies only to strength problems. Stability problems, such as the masonry arch, are governed by geometry.”

Santiago Huerta ²²

A estática gráfica e os modelos funiculares bidimensionais permitem a análise do comportamento das forças e a conceção da forma em planos. Porém, não possibilitam uma manipulação livre e intuitiva da forma no espaço. Por essa razão, a criação de estruturas antifuniculares tridimensionais surgiu da invenção de um outro método de conceção, um método que permite a adaptabilidade das linhas de pressão ao longo da exploração livre e dinâmica no espaço – os modelos funiculares tridimensionais.

O presente capítulo examina três tipos de modelos funiculares através dos protótipos, desenhos e análises dos seus inventores: os modelos com cordas, com membranas e com redes funiculares.

Como as estruturas funiculares e antifuniculares não têm momento fletor (só possuem esforços axiais de tração ou de compressão) e os materiais têm uma resistência muito elevada a esforços axiais, o seu equilíbrio não depende tanto da resistência do material, mas da estabilidade da forma. ²³

Isto significa que os modelos são homotéticos: desde que a forma contenha apenas esforços axiais de compressão e que seja composta por materiais com uma resistência elevada a estes esforços, é possível ampliar a estrutura mantendo a sua esbelteza (o limite dependerá da carga crítica do material à compressão). ²⁴

²² “A lei de Galileu [lei do quadrado-cubo] aplica-se apenas em problemas de força. Problemas de estabilidade, como o do arco de alvenaria, são governados pela geometria.” Huerta S. em “Galileo was Wrong: The Geometrical Design of Masonry Arches” (2006).

²³ Heyman J. sistematizou estas observações em “The Stone Skeleton. Structural Engineering of Masonry Architecture” (1995).

²⁴ O betão, por exemplo, tem uma resistência à compressão dez vezes superior à que tem à tração.

2.2 Modelos com cordas funiculares

Em 1872 Friedrich Gössling (1837-1899) antecipou um método que viria a ser fundamental para a criação de algumas das mais ousadas obras estruturais. Na sua proposta para o Reichstag, o parlamento federal da Alemanha, Gössling projetou a forma combinando o revivalismo Gótico com um novo processo de procura da forma: os modelos funiculares.

Apesar da extraordinária inovação de Gössling, a crítica preferiu o projeto Neobarroco de Paul Wallot, e foi apenas durante o modernismo catalão (entre 1880 e 1930), que os modelos funiculares tridimensionais viabilizaram realmente a criação de uma nova conceção arquitetónica.

O modernismo catalão desenvolveu-se com a disseminação de duas ideias essenciais: a procura pela novidade científica e tecnológica “moderna” e o romantismo nacional com a “retomada” da arquitetura catalã. Neste contexto, a sua arquitetura aliou o desenvolvimento científico a uma visão simbólica, poética e naturalista do espaço. Este alento manifesta-se claramente na obra de um dos arquitetos mais originais de sempre, Antoni Gaudí (1852-1926).

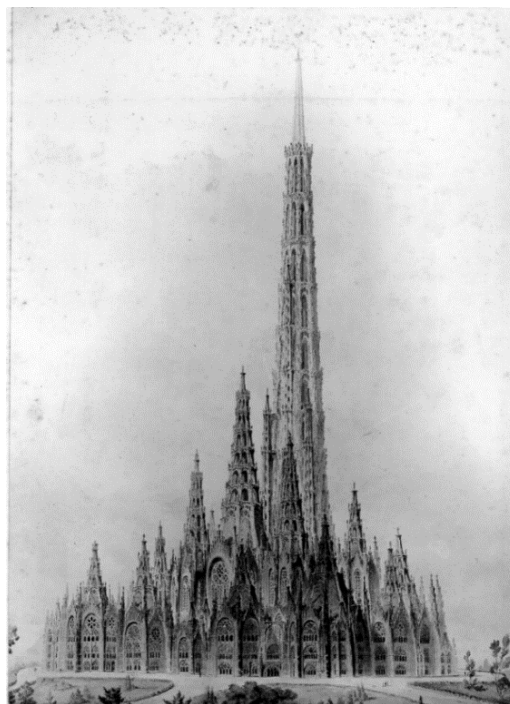


Fig. 23 - Projeto para o Reichstag, 1872, (Gössling F.).

“Ho calculo tot; primer suposant uns pesos per buscar la funícula; i després vesteixo la funícula trobada amb formes i materials, els pesos dels quals torno a revisar, i de vegades vario lleugerament les funícules. D’aquesta manera surt la forma lògica nascuda de les necessitats.

Les funícules de la Sagrada Família, les he trobade graficamente, i les de la Colònia Güell les vaig trobar experimentalmente; però els dos procediments són el mateix i l’un és fil del l’altre.”

Antoni Gaudí ²⁵

Gaudí nutria uma admiração estética, religiosa e espiritual pela natureza. Uma admiração que se expressou na procura por uma concepção morfogenética, holística e estrutural do espaço – por uma arquitetura tão natural que se tornasse um prolongamento da obra de Deus.

Subjugado à procura do ideal platónico de beleza, Gaudí aspirava uma arquitetura orgânica, uma arquitetura cuja “a estrutura é o seu esqueleto, a forma a sua carne e a cor a sua pele fina e rosada”.²⁶

O que tornou a obra estrutural de Gaudí profundamente inovadora foi a ideia de conceber a forma a partir das condições de equilíbrio. Ao contrário da maioria dos arquitetos que se serviam da estática gráfica ou de cordas suspensas para verificar a estabilidade de uma estrutura pré-determinada, Gaudí utilizou-as como processos de concepção.

Através dos processos gráficos, Gaudí concebeu espaços compostos por secções antifuniculares bidimensionais (é o caso das abóbadas do Parque Güell (ver Fig. 16) ou das colunas dendriformes da Sagrada Família (Fig. 24).

²⁵ “Eu calculo tudo: primeiro assumindo certos pesos para encontrar o funicular; em seguida, visto o funicular encontrado com formas e materiais, cujos pesos vou revendo uma vez mais, por vezes variando ligeiramente os funiculares. Deste modo, surge a forma lógica, nascida da necessidade. Encontrei os funiculares para a Sagrada Família graficamente, enquanto os da Colónia Güell experimentalmente: mas ambos os procedimentos são o mesmo, um é filho do outro.” Gaudí A. conforme citado por Martinell C. em “Gaudí i la Sagrada Família, comentada per ell mateix” (1969).

²⁶ Boada P. em “El temple de la Sagrada Família” (1929).

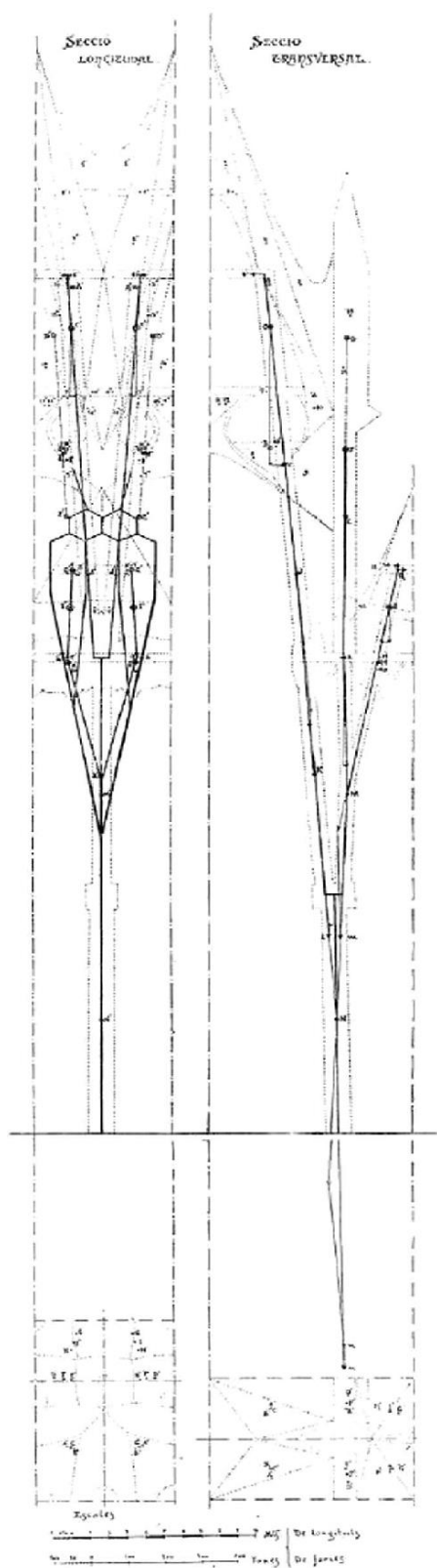


Fig. 24 – Análise de equilíbrio gráfico das colunas dendriformes do Templo Expiatório da Sagrada Família. (Sugraries).

Todavia, para a elaboração de estruturas mais complexas, sem qualquer secção idêntica nas várias direções, Gaudí utilizou um novo método de conceção, os modelos tridimensionais funiculares. Os modelos tridimensionais funiculares permitem uma visualização constante da solução de equilíbrio uma vez que qualquer mudança local deforma a solução de equilíbrio integral (apresentando o resultado da estrutura após qualquer operação de subtração, adição ou movimentação dos elementos no espaço).

As obras de Gaudí diretamente concebidas através das condições de equilíbrio foram desenvolvidas no final do séc. XIX e início do séc. XX, com projetos como: o Palácio Güell (1885-1890), o Parque Güell (1900-1914), a Casa Batlló (1904-1906), a Casa Milá (1906-1912), a Igreja da Colónia Güell (1908-1918) e o Templo Expiatório da Sagrada Família (1883-...). Contudo, o único exemplo, parcialmente construído, cuja a conceção estrutural foi totalmente baseada em modelos funiculares tridimensionais foi a Igreja da Colónia Güell em Santa Coloma de Cervelló.

À escala 1/10, o modelo da Igreja consiste numa plataforma fixa (a planta do templo) onde, em diversos pontos, são suspensos fios e tecidos interconectados com diferentes pesos (à tração).

Para que as forças passassem a exercer compressão, foi necessário inverter a estrutura (antifuncular). Gaudí fê-lo através de fotografias nas quais posteriormente desenhou as formas e materiais dos vazios entre os elementos estruturais.

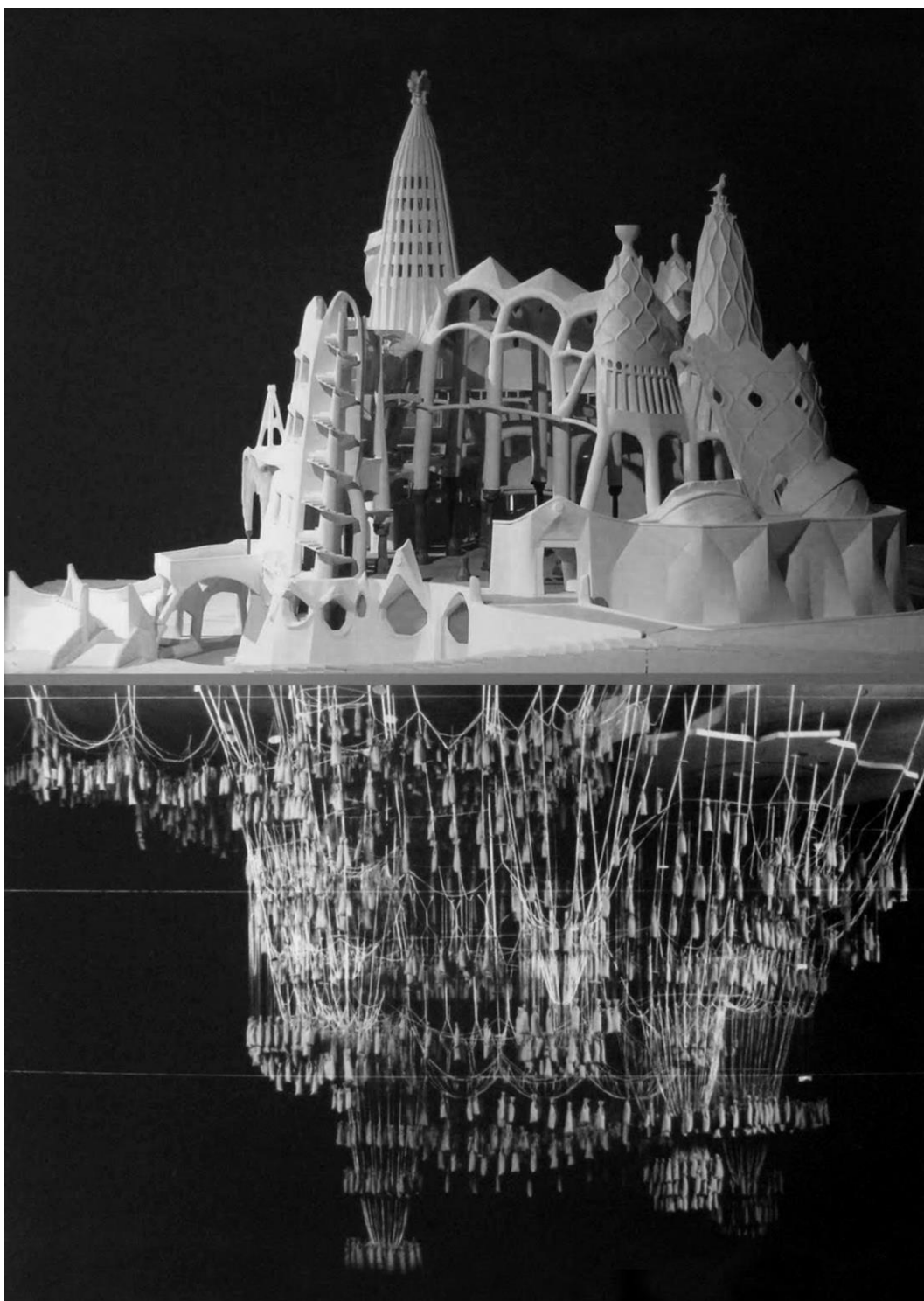


Fig. 25 - Reprodução do modelo funicular com cordas e do respetivo antifunicular em gesso da Igreja Colònia Güell em Santa Coloma de Cervelló (desenvolvido em parceria pela Universidade de Innsbruck e pela Universidade de Moscovo).

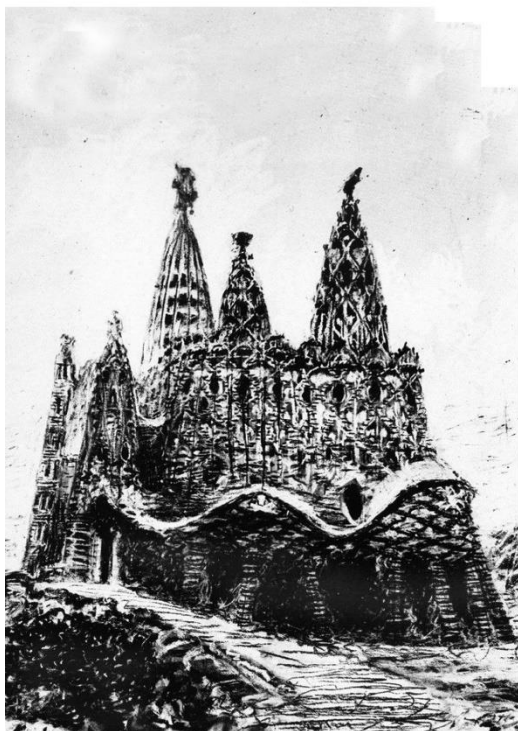
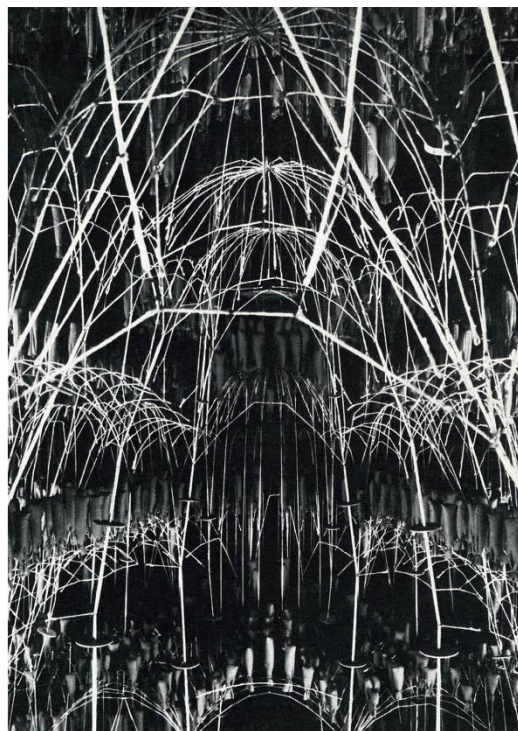


Fig. 26 - Modelos desenvolvidos para a Igreja da Colónia Güell (em cima) e fotografias do modelo pintadas (em baixo). (Gaudí A.).

O templo que Gaudí visionou para a igreja da Colónia Guell seria composto por duas naves (inferior e superior) coroadas por diversas torres laterais e uma central de 41 metros de altura. Porém, a obra ficou a inacabada e só foi construída a nave inferior (a descrição do seu processo construtivo é feita no capítulo 4.1).

Apesar de incompleta, a estrutura do templo transparece qualidades difíceis, senão impossíveis, de projetar sem o recurso a métodos físicos funiculares. O que difere essencialmente as formas geradas pelos modelos funiculares tridimensionais, das formas geradas pela estática gráfica ou modelos funiculares bidimensionais, é a sua espacialidade. Embora os processos gráficos permitam conceber espaços tridimensionais antifuniculares, estes derivam de planos bidimensionais movimentados no espaço (a não ser com diagramas recíprocos, descritos no capítulo 3.2).

Através dos modelos tridimensionais, Gaudí criou uma arquitetura que parece desafiar a lei da gravidade, alento que conflui com a simbologia teológica cristã da igreja como um templo que transcende o reino do homem.

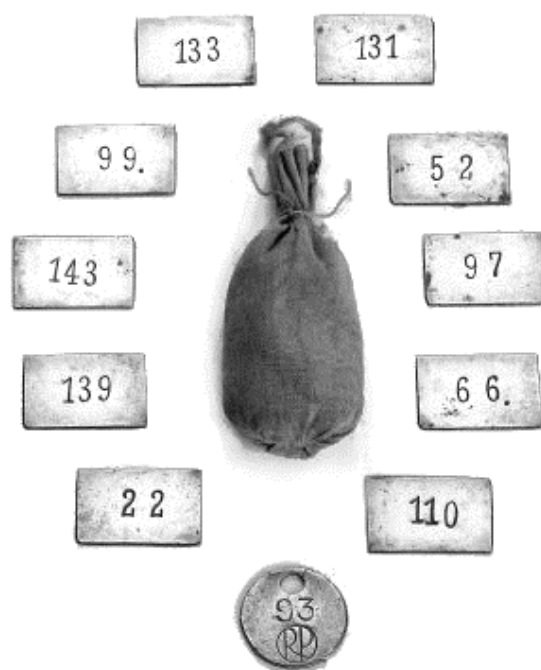


Fig. 27 - Cada saco possuía pesos relativos à carga do elemento estrutural.

2.3 Modelos com membranas funiculares

“The hanging cloth is for three-dimensional problems what the catenary line is for two-dimensional arches. They obey the same fundamental principle. The moulding forces being evidently parallel, we get automatically a system which safety can carry the loads. For large shells this method is the best.”

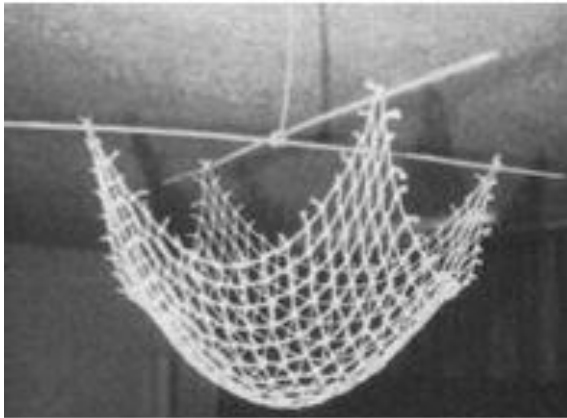
Heinz Isler²⁷

Os modelos com cordas permitem projetar experimentalmente em três dimensões. Caso o rigor seja absoluto (calculando e escalando a relação entre os diferentes pesos e medidas) pode-se projetar modelos homotéticos estruturalmente exequíveis. No entanto, estas estruturas são esqueletos. Para que a massa entre o esqueleto não afete a sua forma é necessário que esta seja muito inferior a ele.

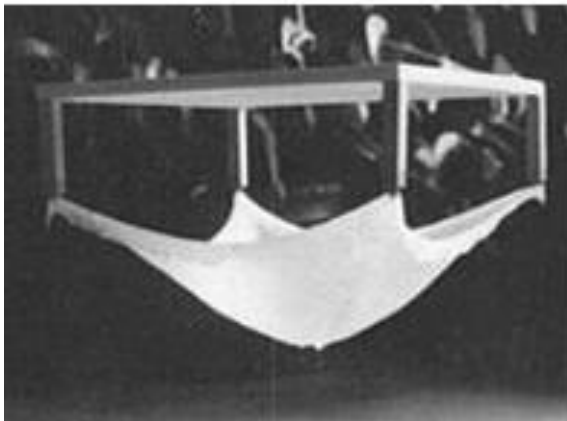
No século XX, surgiu uma outra evolução na concepção de estruturas comprimidas – a criação de cascas antifuniculares. Em 1959, no primeiro congresso da International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Heinz Isler (1926-2009) apresentou três métodos para a criação e construção de cascas: a distribuição do betão num molde de terra; a disposição do betão numa membrana pressurizadas; e, a concepção através de modelos de tecido suspensos. Entre estes métodos, Isler compreendia que a concepção da forma através de modelos de tecido suspensos era o mais eficiente e foi através deste processo que encontrou a forma de algumas das suas obras estruturais mais emblemáticas: a fábrica para F. Kilcher em Rechterswill (1965) a sede da fábrica de Sicli SA em Genebra (1969) o Centro de Ténis em Burgdorf (1980) e o Museu da Força Aérea Suíça em Dübendorf (1987).

Apesar de nunca ter construído as suas cascas através do processo (o sistema construtivo é descrito no capítulo 4.2), ele permitiu encontrar a forma das suas estruturas. Estas eram superfícies absolutamente isotrópicas, superfícies cujas as partes estão sujeitas a estados de tensão idênticos em todas as direções.

²⁷ “O pano pendurado é para problemas tridimensionais o que a linha da catenária é para arcos bidimensionais. Eles obedecem ao mesmo princípio fundamental. Sendo as forças do molde evidentemente paralelas, obtemos automaticamente um sistema que pode transportar as cargas com segurança. Para cascas grandes, esse método é o melhor.” Isler H. em “New shapes for shells, Bulletin of the International Association for Shell Structures” (1961).



Para tal, Isler embebeu tecidos suspensos com gesso pulverizado, resina líquida ou água que, em seguida, endureceriam por secagem ou congelamento. Quando solidificada, a forma era invertida, rigorosamente determinada e estruturalmente analisada.



Através deste método Isler contruiu algumas das mais esbeltas e elegantes cascas edificadas.

Fig. 28 - Modelos funiculares de tecido e trama. As estruturas em grelhas não têm tanta tensão tangencial e, por isso, tendem a ter formas de dupla curvatura sinclásticas. Ao contrário destas, as estruturas em tecido propendem a criar vincos e curvaturas anticlásticas. (Isler H.).

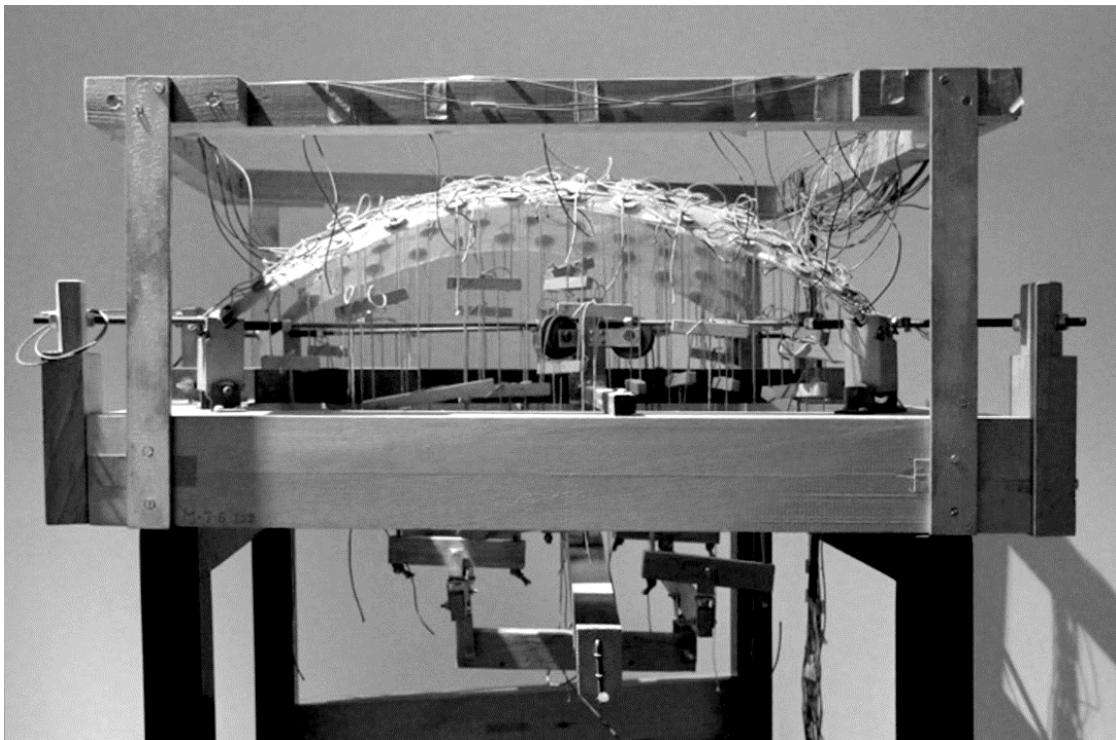


Fig. 29 – Modelo de acrílico utilizado para a análise da distribuição de tensões e do comportamento de enfunamento da casca da fábrica de Kilcher, em Rechterswill (1965).



Fig. 30 – Constituída por um tecido humedecido suportado por um balão e uma vara, esta estrutura foi endurecida por congelamento, o que permitiu a posterior remoção dos suportes. (Isler H.).



Fig. 31 - Com apenas um tecido coberto de uma fina camada de gelo foi possível gerar estas esbeltas estruturas autoportantes. As estruturas mais utilizadas nestas experiências foram pneumáticas e polifuncionares. (Isler H.).

2.4 Modelos com redes funiculares

“My hope is that light, flexible architecture might bring about a new and open society”.

Frei Otto ²⁸

Frei Otto (1925-2015) sentia um dever ético sobre a ecologia e a sociedade, um dever que se projetou numa visão arquitetónica que procurou uma harmonia com a Natureza. Tanto nas suas conceções ideais, como na sua arquitetura, Frei Otto manifestou essa visão através de uma liberdade criativa profundamente inspirada em fenómenos físicos.

Esta visão foi concretizada através de diversos processos de auto-organização da forma como: os modelos tensioativos de superfícies mínimas (geradas do emergir de um perímetro fechado num líquido tensioativo); os modelos pneumáticos (criados a partir de membranas fechadas pressurizadas); os modelos arborescentes (gerados através de percursos mínimos de cordas tracionadas ou líquidos tensioativos); e os modelos funiculares (com correntes, membranas e redes suspensas). Através destes processos, Otto abriu novos campos de investigação que possibilitaram a invenção de diferentes tipos de estruturas que nunca poderiam ter sido descobertas através das convencionais ferramentas e geometrias euclidianas.

Porém, a abordagem de Frei Otto expandiu-se além dos critérios estruturais e envolveu parâmetros ambientais, energéticos, lumíneos e estéticos que procurou integrar na morfologia das estruturas que criou. Frei Otto compreendia que o seu papel não era o de um projetista, mas de um cultivador que aguarda pela manifestação das sementes que plantou:

“The desire to create a deliberate design stands in contradiction to the search for a shape which, while as yet undiscovered, is nevertheless subject to the laws of nature.”

Frei Otto²⁹

²⁸ “A minha esperança é que uma arquitetura leve e flexível possa trazer uma sociedade nova e aberta”. Otto F. em “Die Zeit” (2003)

²⁹ “O desejo deliberado de criar uma forma está em contradição com a procura de uma forma que, apesar de ainda não ter sido descoberta, está sujeita às leis da natureza.” Otto F. em “Das Zeltdach. Subjektive Anmerkungen zum Olympiastadion” (1972).

Quanto ao desenvolvimento de estruturas comprimidas, Frei Otto foi o primeiro a utilizar modelos com redes funiculares para a concepção de cascas em grelha de madeira. A primeira estrutura cuja procura da forma foi desenvolvida através deste método foi a casca em Deubau (1962). Porém, o modelo foi criado com fios suspensos carregados de pregos, técnica que, além de morosa, é visualmente confusa. No entanto, na casca da Multihalle de Mannheim (1975), desenvolvida em parceria com a firma de arquitetos Carlfried Mutschler e Winfried Langner, Frei Otto aperfeiçoou o processo com o modelo de correntes em rede (Fig. 34) e da sucessiva utilização de modelos matemáticos gerados por computador.

Com um vão de 80 metros, uma área coberta de 7400m² e um peso próprio de 20kg/m², a Multihalle de Mannheim continua a ser a maior estrutura de cascas em grelha de madeira e uma das mais largas e leves estruturas comprimidas do mundo. No entanto, importa frisar que apesar da forma do pavilhão ter sido projetada inicialmente através dum modelo funicular, o processo construtivo envolveu a flexão dos membros de madeira (posteriormente tracionados com cabos para impedir a rutura por excessivos esforços de flexão). Assim, as geometrias geradas foram curvas elásticas ao invés de curvas funiculares (no capítulo 3.1 é demonstrada a diferença geométrica das duas curvas).

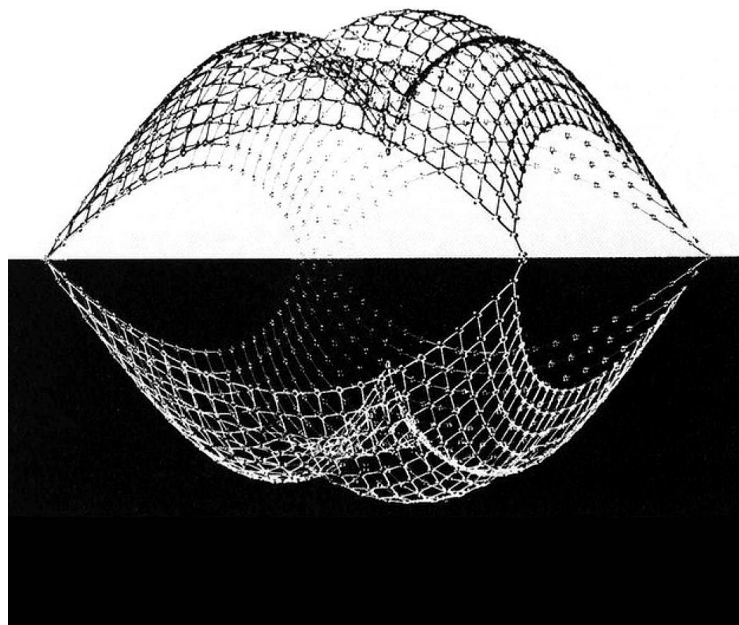


Fig. 33 – Modelo funicular de uma rede (em baixo) e o respetivo antifunicular (em cima).

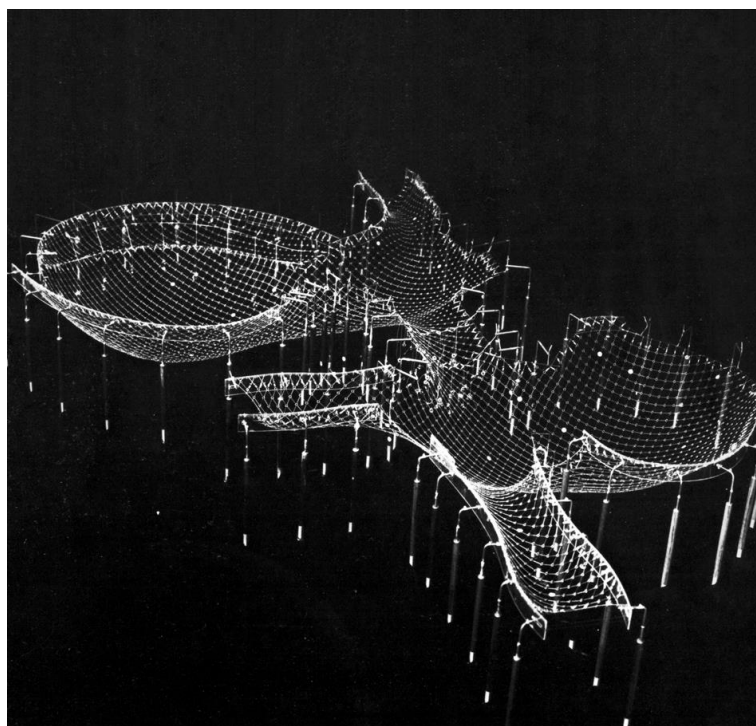


Fig. 34- A forma da casca em grelha do Multihalle de Mannheim (1975) foi descoberta através do modelo em grelha funicular (Otto F.).



Fig. 35 – Nesta fotografia podemos ver através do reflexo do charco de água a forma invertida do pavilhão da Multihalle de Mannheim.

2.5 Outros métodos

“Cell and tissue, shell and bone, leaf and flower, are so many portions of matter, and it is in obedience to the laws of physics that their particles have been moved, moulded and conformed.”

D’Arcy Thompson³⁰

Quanto maior a deformabilidade do sistema, mais a sua forma se aproximará das forças externas que a sujeitam. Este é o princípio físico elementar na criação de qualquer processo de procura da forma – o equilíbrio final surge da deformação da matéria num estado transitório de desequilíbrio. Este simples conceito abre as possibilidades para um vasto campo de metodologias que surgem das propriedades de deformabilidade dos materiais – quer sejam sólidos, líquidos ou gasosos.

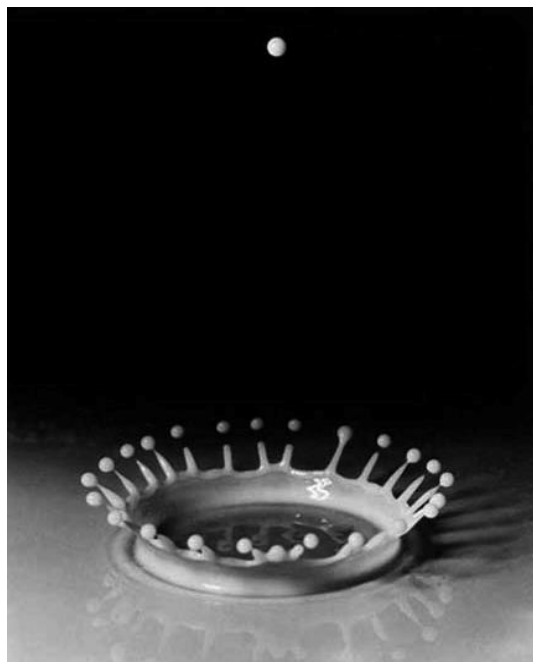


Fig. 36 - Auto-organização de um respingo de leite.³¹ Foto de D’Arcy Thompson (1917).

³⁰ “Células e tecidos, conchas e ossos, folhas e flores são tantas partes da matéria, e é em obediência às leis da física que as suas partículas foram movidas, moldadas e conformadas.” Thompson D. em “On Growth and Form” (1915).

³¹ A auto-organização de um fenómeno é a ordem emergente das interações locais de um sistema. Na cristalização, na dinâmica de fluidos, nas reações oscilantes químicas, nos enxames de animais, nos circuitos neurais, na distribuição fluvial, ... ou nas estruturas polifuncionares podemos observar fenómenos automáticos de auto-organização da matéria.

3. Modelos digitais

A conceção do projeto está a transitar do ambiente físico para o ambiente virtual. Contudo, a criação no ambiente virtual não implica usualmente constrangimentos físicos, não implica força nem massa, apenas geometria. Em diversas ocasiões, a forma pode ser contemplada numa imagem, mas não pode ser suportada na realidade.

Todavia, com o advento da tecnologia CAD (Desenho Assistido por Computador), CAE (Engenharia Assistida por Computador) e CAM (Manufatura Assistida por Computador) têm surgido um vasto conjunto de ferramentas que permite o desenho, análise e a manufatura de estruturas eficientes através da introdução de parâmetros “físicos” na conceção virtual.

Estas ferramentas têm incentivado uma exploração diversificada de geometrias que, em certas ocasiões, seriam impossíveis de conceber, analisar ou manufaturar através de modelos físicos.

A criação de modelos digitais tem vantagens práticas: a fácil captação de vistas ortométricas, axonométricas ou perspéticas; a sucessiva renderização com simulações de materiais, iluminação, cor, etc.; a manipulação da forma através de diferentes operações geométricas; a análise computacional de vários parâmetros da geometria final (análises térmicas, ambientais, estruturais... e económicas do projeto); e a fabricação auxiliada por computador (uso de código para o controle de máquinas-ferramentas).

Por estes motivos, o desenvolvimento de estruturas polifuncionares é maioritariamente realizado através de processos digitais.

Para tal é necessário um conhecimento das metodologias e especificidades inerentes a cada um dos programas CAD. Ao longo deste capítulo serão analisados dois processos: a Relaxação Dinâmica e a Análise de Impulsos de Rede. A intenção não é apresentar de forma exaustiva os diferentes processos, mas sim, alguns dos seus princípios, fluxo de trabalho e aplicações.

Família	Nome	Tradução (do autor)	Software	Ano
Estática Gráfica	Thrust Network	Análise de Impulsos	Rhino	2007
	Analysis	de Rede	RhinoVAULT	
Equilíbrio Dinâmico	Dynamic Relaxation	Relaxação Dinâmica	Grasshopper Kangaroo	2010
	Particle-Spring System	Sistema Elástico de Partículas	CADenary	2004
Elementos Finitos	Topology Optimization	Otimização Topológica	Solidworks	1988

Tab. 1 – Processos digitais de procura da forma e otimização de estruturas polifuniculares.

3.1 Relaxação Dinâmica

“Particles are objects that have mass, position, and velocity, and respond to forces, but that have no spatial extent. Despite their simplicity, particles can be made to exhibit a wide range of interesting behavior. For example, a wide variety of nonrigid structures can be built by connecting particles with simple damped springs.”

Andrew Witkin ³²

O processo de Relaxação Dinâmica (*Dynamic Relaxation*) pode ser utilizado com várias ferramentas digitais. Porém, ao longo deste subcapítulo, o processo será analisado através do *Kangaroo*. Desenvolvido por Daniel Piker, o *Kangaroo* é um *plug-in* do *Grasshopper* do programa *Rhinoceros*, que permite a exploração da forma através da conjugação de parâmetros físicos.

A formulação da Relaxação Dinâmica em geometrias polifunculares implica a integração matemática de duas leis essenciais: a Lei Fundamental da Dinâmica de Isaac Newton (1643-1727) ³³ e a Lei da Elasticidade de Robert Hooke (1635-1703). ³⁴

A Lei Fundamental da Dinâmica, também chamada a segunda Lei de Newton, exprime um princípio elementar. Em um sistema de referencia inercial, a força aplicada sobre um objeto é igual à massa (constante) a multiplicar pela sua aceleração. Ou seja, a força aplicada a um corpo produz uma aceleração diretamente proporcional a ela. A outra lei fundamental, a Lei da Elasticidade, afirma que a força necessária para tracionar ou comprimir qualquer corpo é linearmente proporcional à deformação causada.

³² “Partículas são objetos que têm massa, posição, velocidade e respondem a forças, mas que não têm extensão espacial. Apesar de sua simplicidade, as partículas podem ser criadas para exibir uma ampla gama de comportamentos interessantes. Por exemplo, uma grande variedade de estruturas não rígidas pode ser construída conectando partículas com simples molas amortecidas.” Witkin A. em “Physically Based Modeling: Principles and Practice | Particle System Dynamics” (1997).

³³ As três leis do movimento foram compiladas pela primeira vez por Isaac Newton em “*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*” (1686).

³⁴ Hooke publicou a solução do anagrama que abarca o princípio da Elasticidade “*ut tensio, sic vis*” (“como a extensão, então a força”) em “*De Potentia Restitutiva, or of Spring. Explaining the Power of Springing Bodies*” (1678).

Sumarizando, esta técnica utiliza ambos os princípios para traçar, passo a passo, o movimento gerado por uma determinada força das partículas de grelhas ou curvas elásticas até estas relaxarem num estado de equilíbrio estático.

Para a geração de estruturas antifuniculares os *inputs* e parâmetros são: as *meshes* ou curvas deformáveis, os apoios, e uma força uniformemente distribuída vertical. Esta força, cuja a intensidade pode ser variada, provocará uma deformação na geometria semelhante ao relaxamento de um tecido, grelha ou corda com a força da gravidade (funicular). No entanto, invertendo a direção da força, a estrutura deformatar-se-á como se estivesse a ser atraída para o zénite (antifunicular). Enquanto que nos modelos físicos a gravidade tem aceleração constante, e o parâmetro que possibilita aumentar ou diminuir a deformação é a massa das diferentes partes, no código paramétrico a massa é constante e é a variação da intensidade da força que proporciona a deformação da geometria.

Com a variação da localização dos apoios, da intensidade da força, da geometria e da divisão da *mesh* é possível criar uma ampla variedade de formas funiculares. Além disso, o *Grasshopper* viabiliza um amplo controle paramétrico através de outros *plugins* e códigos personalizados.

Contudo, o processo tem uma limitação, ele não possibilita a criação intuitiva de deformações variáveis nas diferentes partículas da *mesh*. Ou seja, a colocação de pesos distintos nos diversos lugares do conjunto estrutural é morosa. Desta forma, é uma ferramenta adequada para a criação de geometrias isotrópicas, mas inadequada para a criação de estruturas antifuniculares cujos elementos têm diferentes espessuras e cargas entre si.

“At its core, Kangaroo is a tool for minimizing the total potential energy of a system.

Provided the energies used are formulated in the correct way, the result will be numerically accurate.”

Daniel Piker³⁵

³⁵ “Na sua essência, o Kangaroo é uma ferramenta para minimizar a energia potencial total de um sistema. Desde que as energias utilizadas sejam formuladas da maneira correta, o resultado será numericamente preciso.” Piker D. na conferência Diderot Mathematical Forum: Mathematics and Architecture sob o título “Design exploration through minimisation” (Praga, 2019).

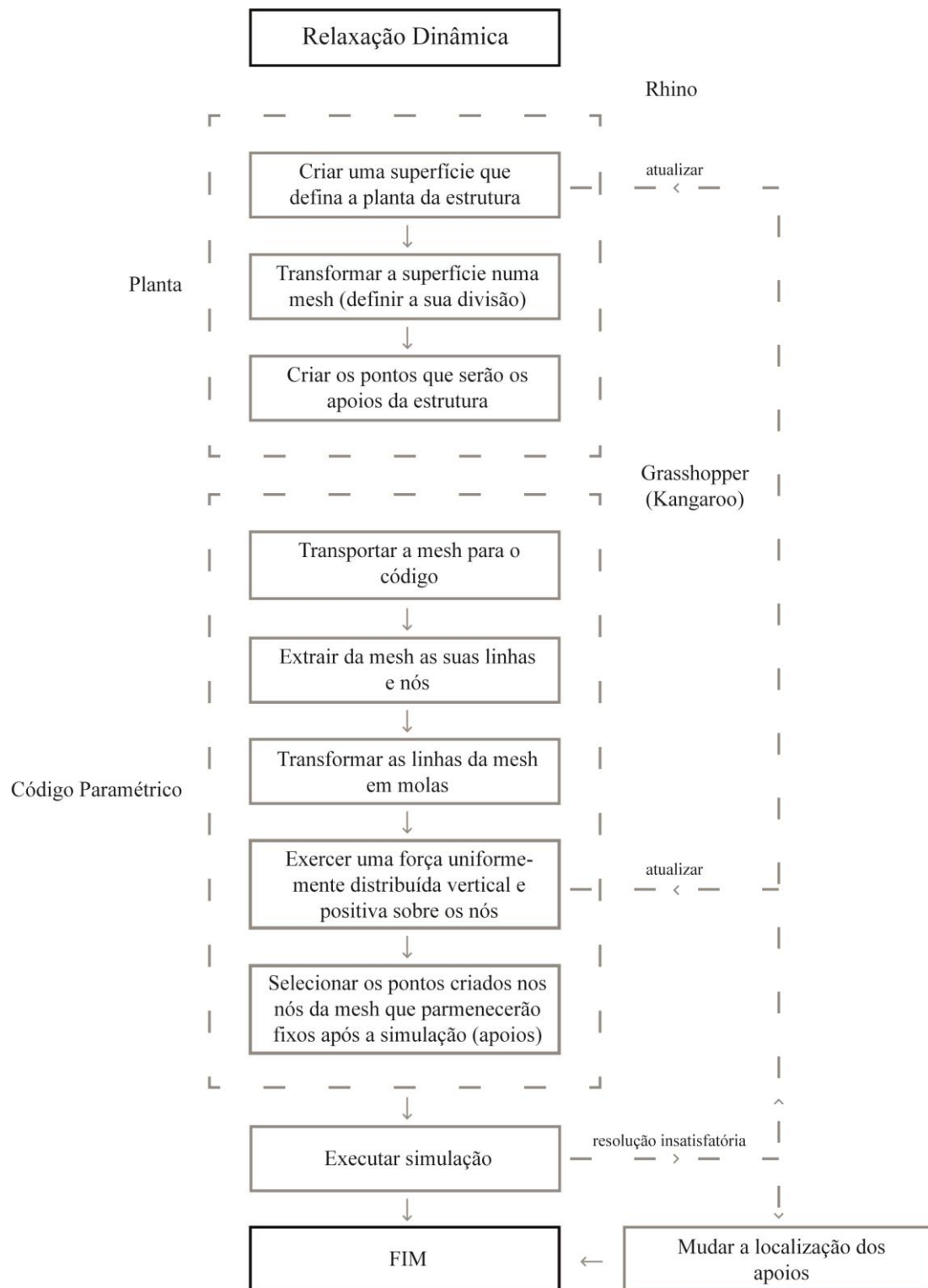


Fig. 37 – Diagrama de fluxo de trabalho de RD.

Fig. 38 - Transformação através do aumento da força vertical (a). Transformação através da diminuição da densidade da *mesh* (b). Transformação através da triangulação da *mesh* (c). (do autor)

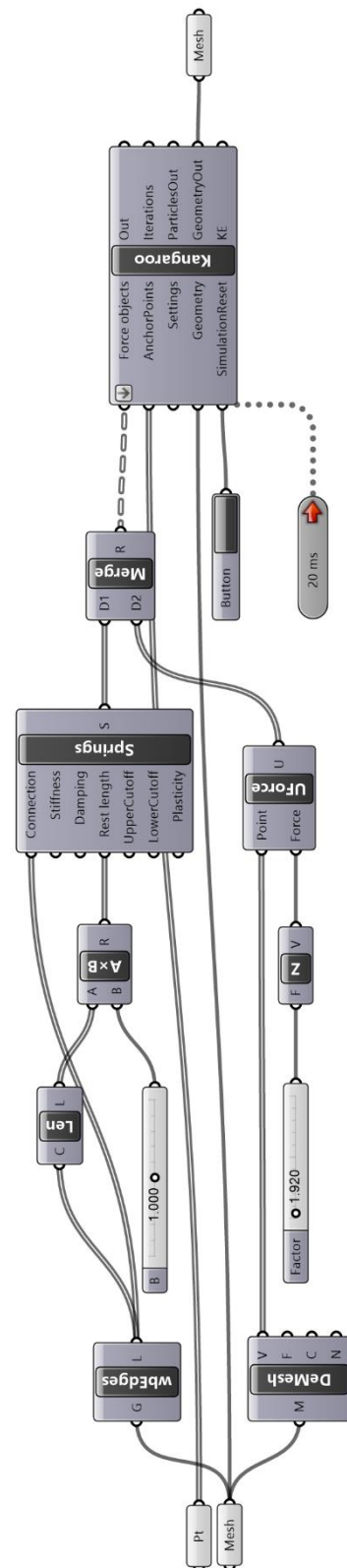
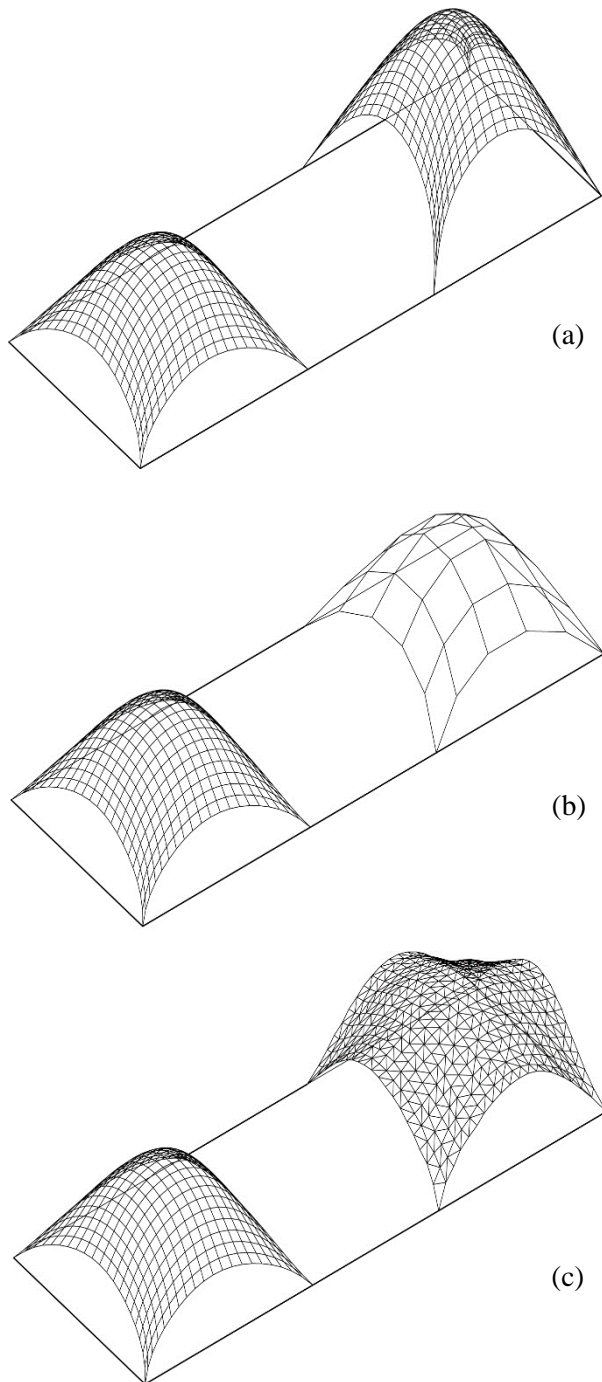


Fig. 39 – Exemplo do código criado através do *Grasshopper* com os *plug-ins* *Kangaroo* e *Weaverbird*.

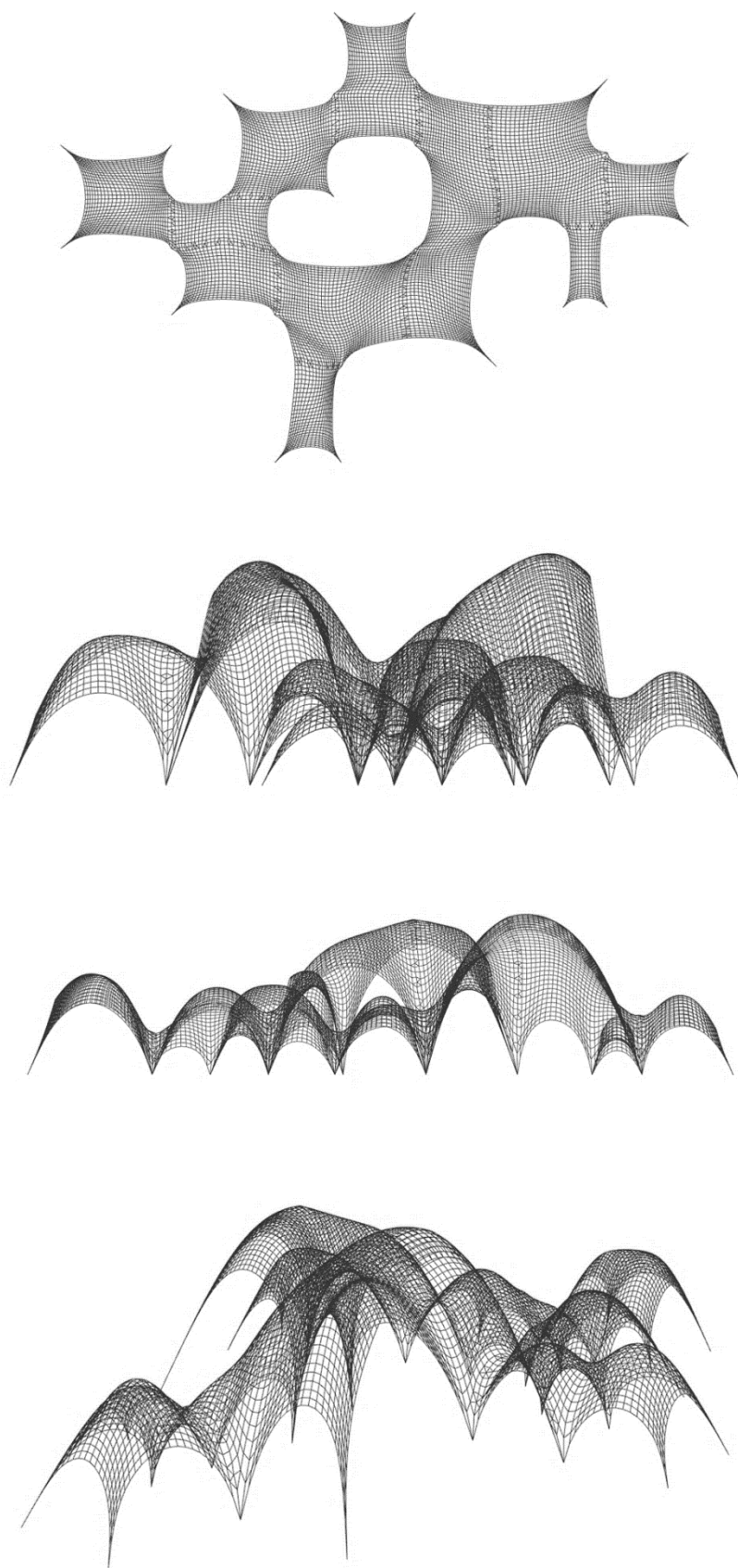


Fig. 40 – Diferentes vistas de uma estrutura antifunicular criada através de RD. (do autor)

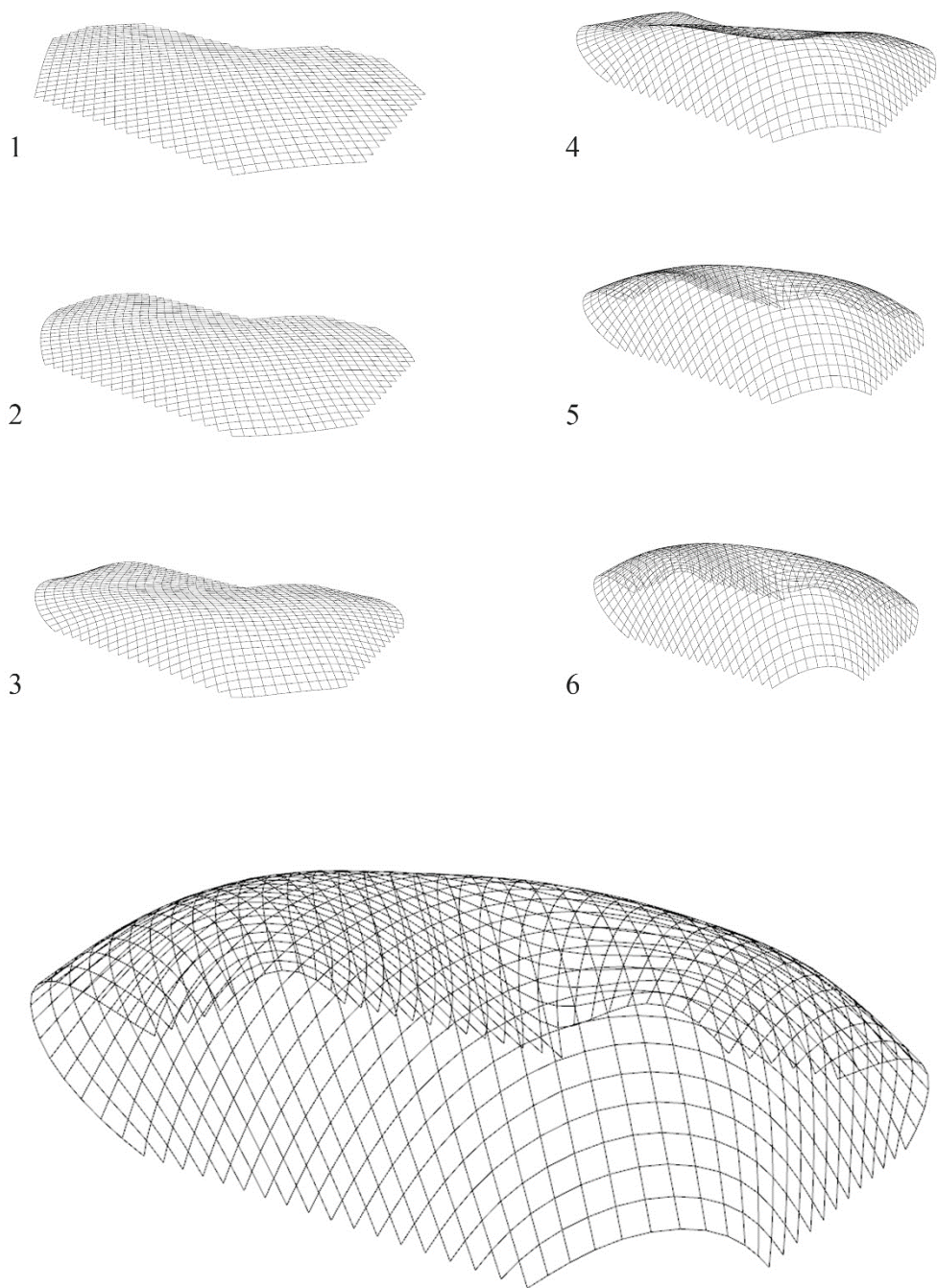
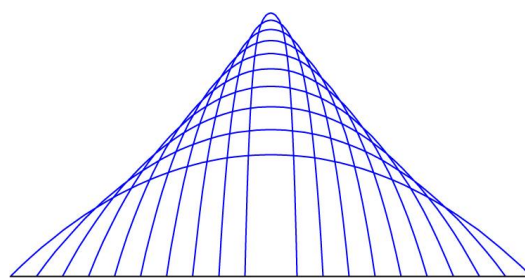
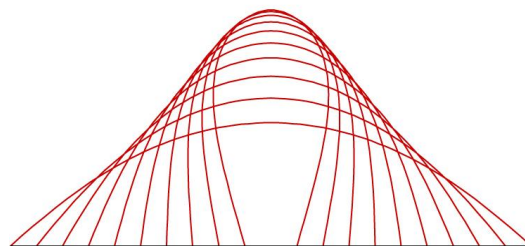


Fig. 42 – Sequência da flexão de uma casca em grelha. (do autor)



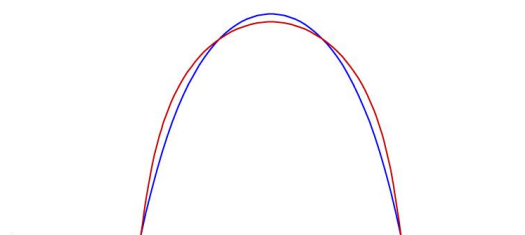
catenária



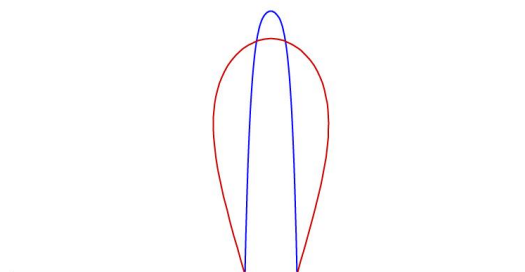
elástica



catenária vs elástica - flecha baixa



catenária vs elástica - flecha média



catenária vs elástica - flecha alta

Fig. 43 – As diferenças entre a curva catenária e a curva elástica acentuam-se à medida que a flecha aumenta. Tal se deve à rigidez do material e à sua resistência à flexão. (do autor)

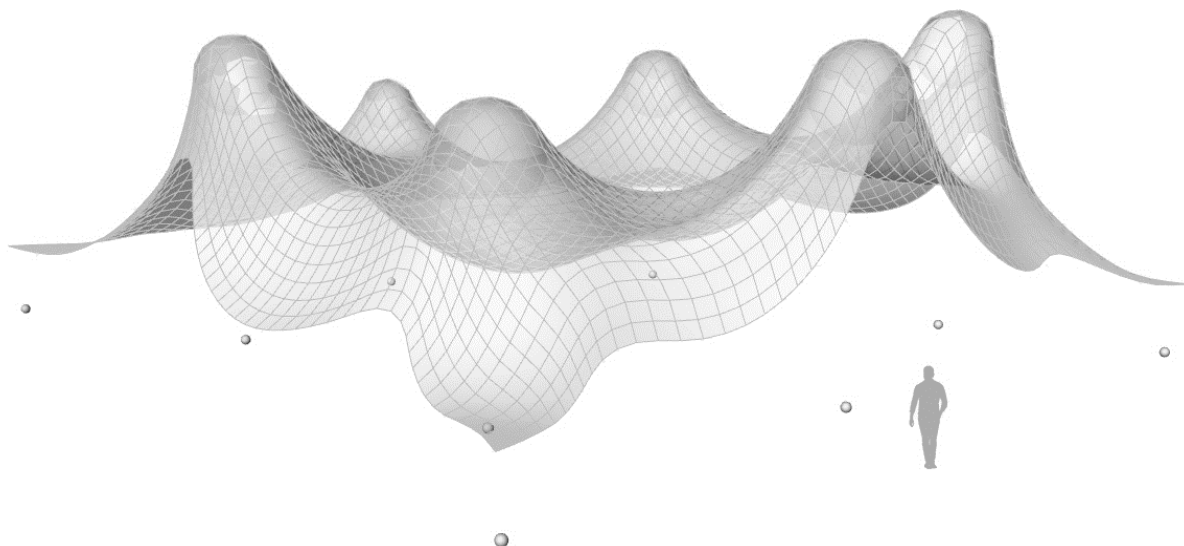
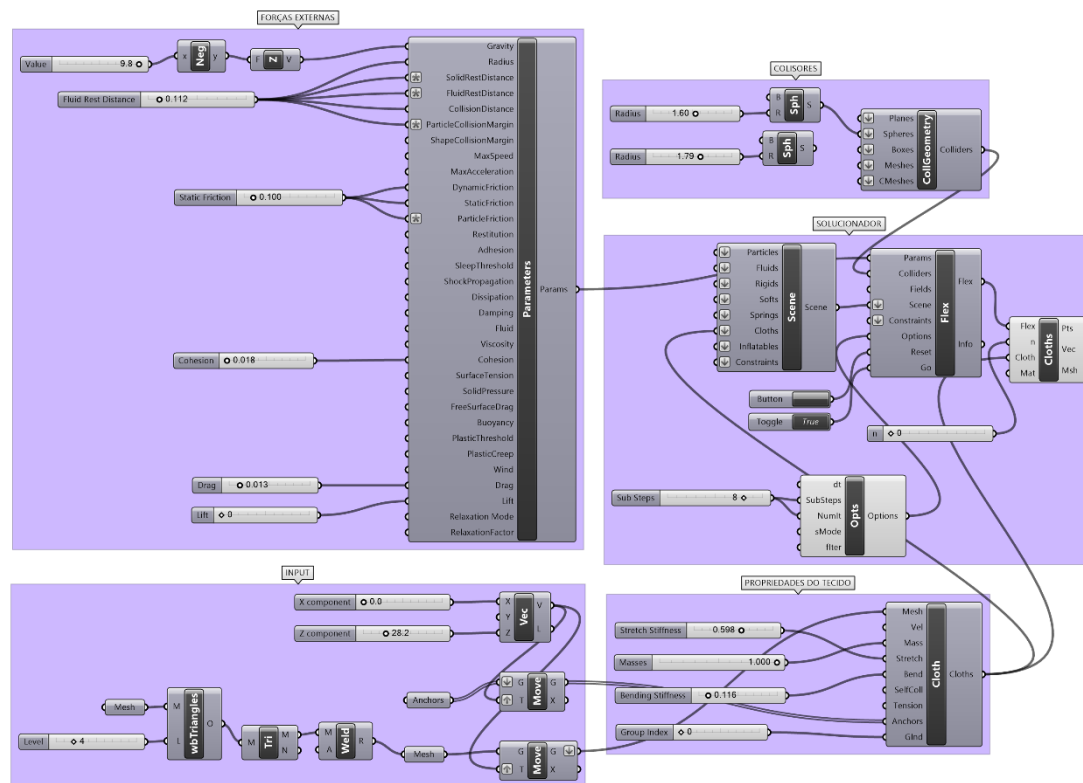


Fig. 44 - Outro *plugin* que permite a manipulação de certos fenômenos físicos é o *FlexHopper*. Este simulador possibilita a criação de simulações sobre a deformação de partículas livres, fluidos, corpos rígidos, corpos moles, estruturas tracionadas e tecido através da adição de inúmeras forças internas e externas aos corpos. (do autor)

3.2 Análise de Impulsos de Rede

“Two plane figures are reciprocal when they consist of an equal number of lines, so that corresponding lines in the two figures are parallel, and corresponding lines which converge to a point in one figure form a closed polygon in the other. If forces represented in magnitude by two lines of a figure be made to act between the extremities of the corresponding lines of the reciprocal figure, then the points of the reciprocal figure will all be in equilibrium under the action of these forces.”

James Maxwell ³⁶

A estática gráfica apresenta métodos basilares para a compreensão de estruturas antifuniculares, tanto para a análise de edifícios de alvenaria como para a concepção de novas estruturas comprimidas. Contudo, torna-se demasiado complexa no desenvolvimento de estruturas tridimensionais.

Desenvolvido por Philippe Block (2009), o método de Análise de Impulsos de Rede (*Thrust Network Analysis*) surgiu para colmatar esta limitação.

As formas geradas pelo processo surgem de diagramas recíprocos. A partir da Fig.45 podemos compreender que existe uma relação circular entre a estrutura, a sua projeção horizontal e o diagrama recíproco de forças: as ações horizontais são representadas pelo diagrama recíproco no plano de nível (Γ^*); e é da sua manipulação e da função vertical que se originam as diferentes soluções antifuniculares em equilíbrio (G); e que a solução estrutural em equilíbrio (G) tem uma projeção horizontal (Γ); e é desta que se gera o diagrama recíproco (Γ^*) ...

Assim sendo, existem “infinitas” soluções em equilíbrio (G) para uma determinada projeção horizontal (Γ) (alterando a escala do diagrama de forças recíproco (Γ^*) ou a intensidade da função vertical cria-se uma estrutura com uma flecha mais ou menos acentuada).

³⁶ “Duas figuras planas são recíprocas quando compreendem um número igual de linhas, de modo que as linhas correspondentes nas duas figuras são paralelas e as linhas correspondentes que convergem para um ponto em uma figura formam um polígono fechado na outra.” J. Maxwell, “On Reciprocal Figures, Frames, and Diagrams of Forces” (1864).

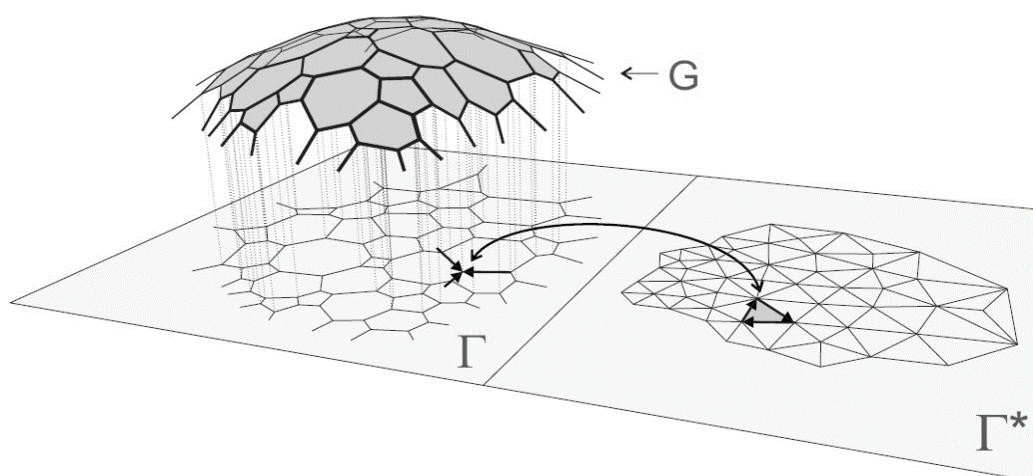


Fig. 45 – Relação entre a forma duma estrutura comprimida equilibrada (G), a sua projeção horizontal (Γ) e o diagrama recíproco (Γ^*) (Block P.).

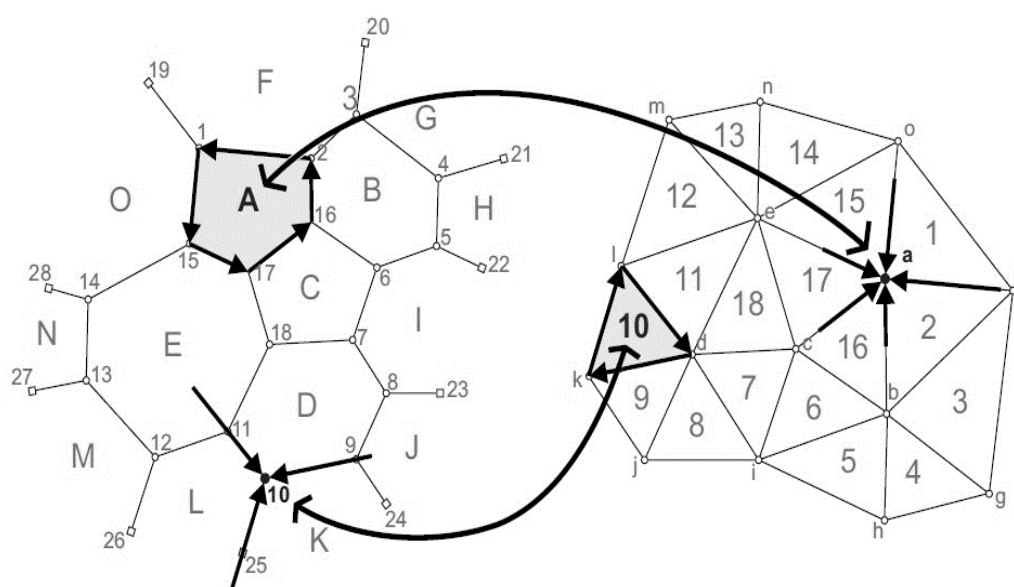


Fig. 46 – A projeção das forças da estrutura no espaço (à direita) e o diagrama de forças (à esquerda) têm uma relação recíproca. O equilíbrio de um nóculo num é garantido por um polígono fechado no outro e vice-versa. (Block P.).

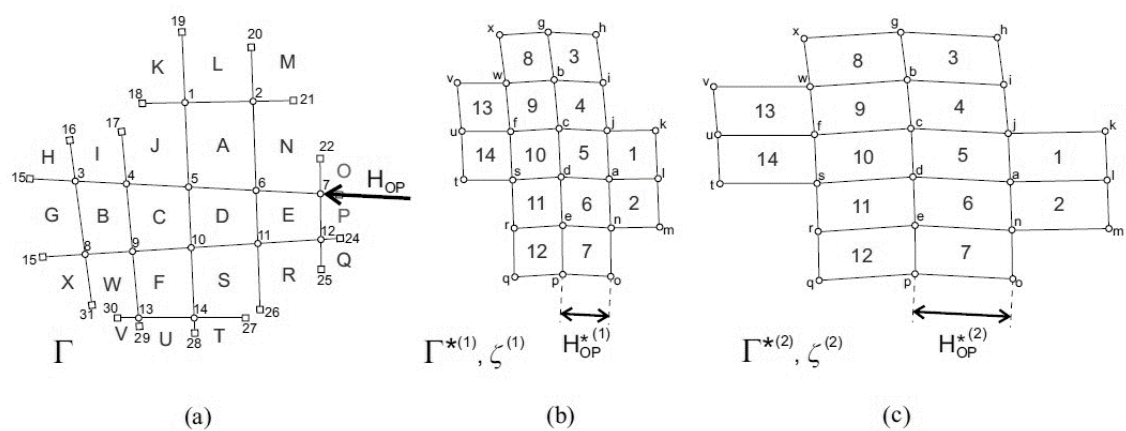


Fig. 47 – Para uma projeção de forças (a) existem múltiplas hipóteses de diagrama de forças recíprocos possíveis (Block P.).

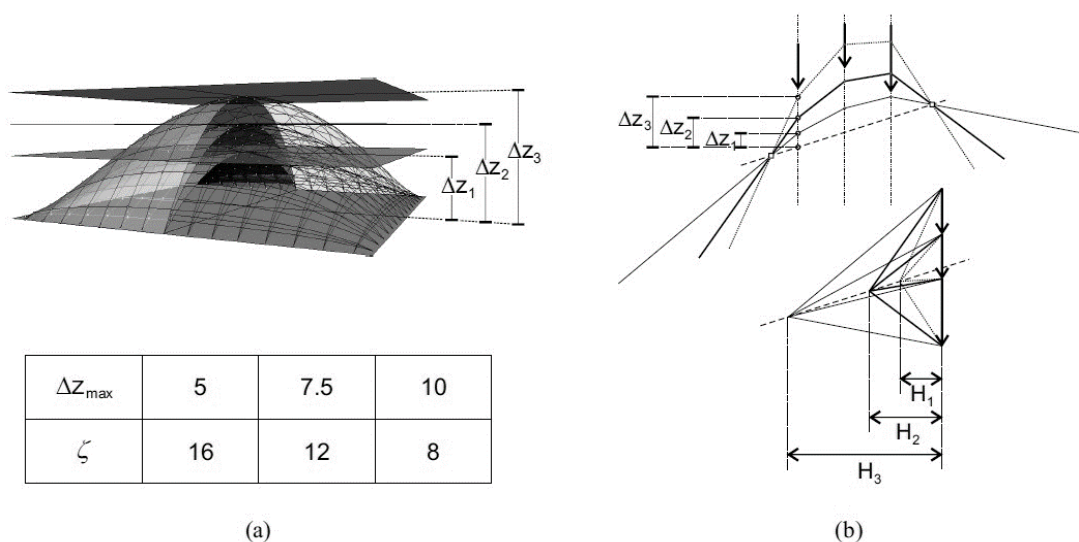


Fig. 48 – Aumentando a escala do diagrama de forças recíproco aumenta-se o impulso horizontal do sistema e, assim, cria-se uma estrutura com uma flecha menor. Este fenómeno é equivalente ao afastamento do polo ao longo do eixo principal de um polígono funicular (Block P.).

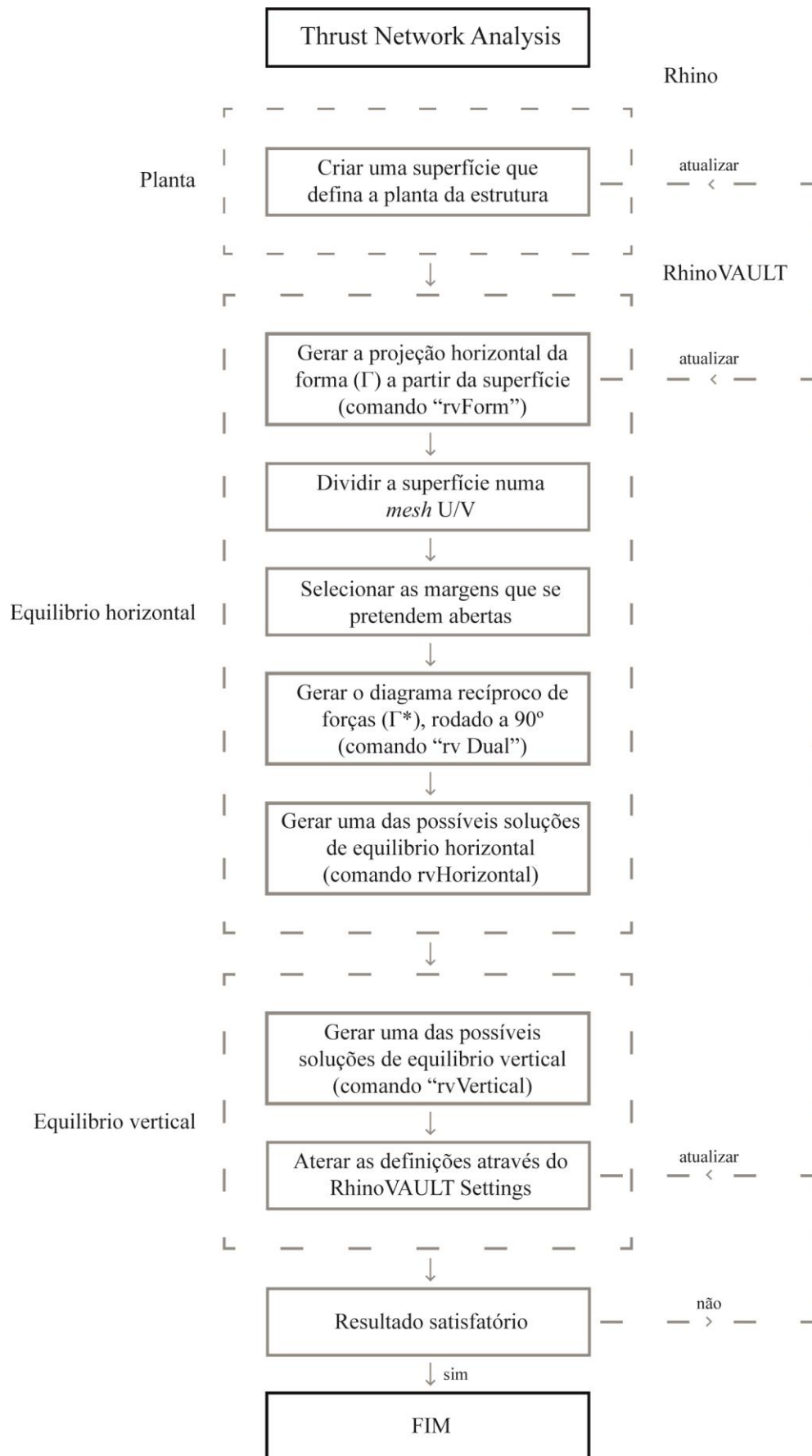


Fig. 49 - Diagrama de fluxo de trabalho de TNA.

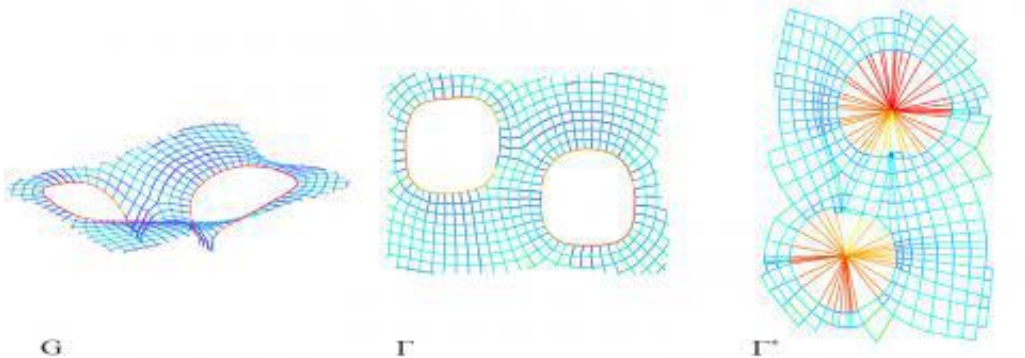
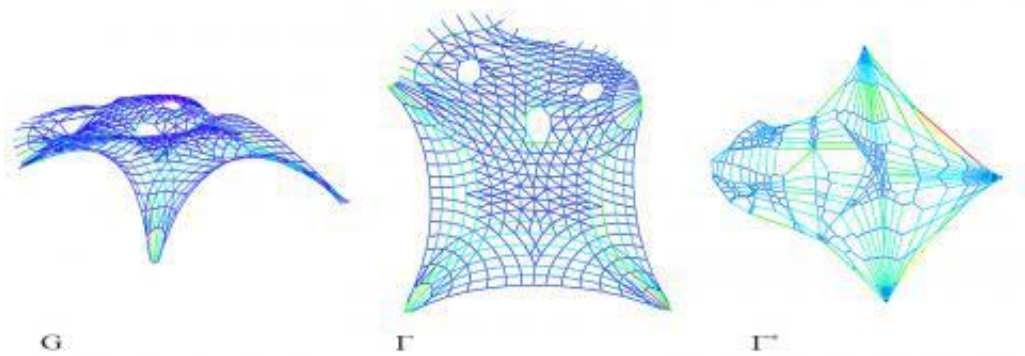
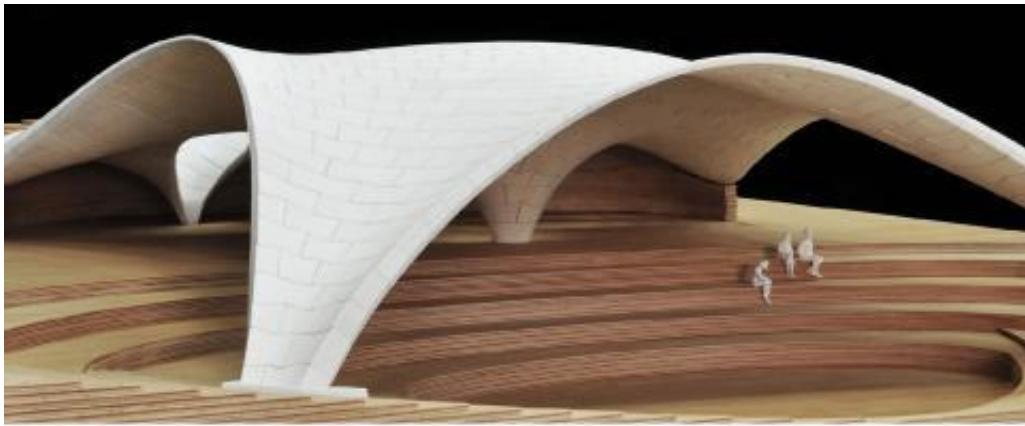


Fig. 50 – Modelos impressos em 3D sem cola entre as aduelas e os respetivos desenhos digitais da forma da estrutura comprimida em equilíbrio (G), a sua projeção horizontal (Γ) e o seu diagrama recíproco (Γ*). (Block P.)

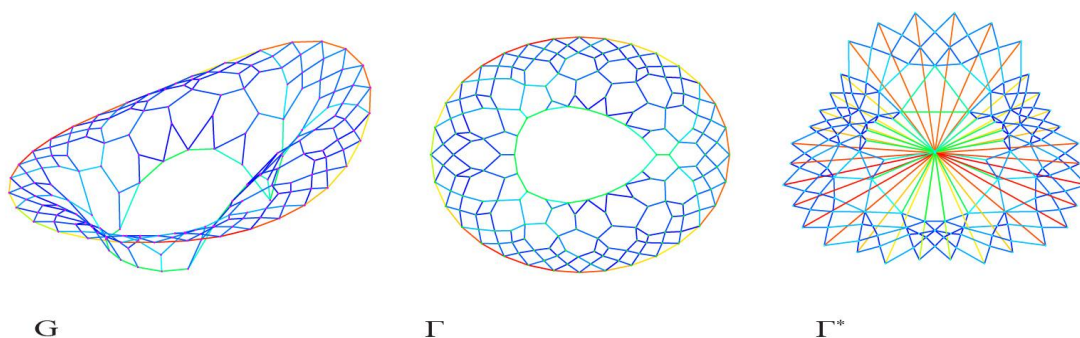


Fig. 51 - Modelo impresso em 3D, o respetivos desenho da estrutura comprimida em equilíbrio (G), a sua projeção horizontal (Γ) e o seu diagrama recíproco (Γ^*). Este modelo não tem cola entre as aduelas e o seu impulso horizontal é travados por um fio tracionado ao longo do perímetro da estrutura. Na imagem inferior vemos o momento em que o fio tracionado está prestes a ser cortado, o que originará a sucessiva queda da estrutura. (Block P.)

“Like graphic statics for 2-D, Thrust Network Analysis is a holistic, bidirectional design and analysis tool. It is a truly 3-D extension, which allows for structurally informed architectural explorations, but also for sculptural escapades because of the possibility to exploit the structural indeterminacy. Instead of trying to find the “right” answer for the indeterminacy, the variations in equilibrium solutions become an added level of control and flexibility for the designer.”

Philippe Block³⁷

A Análise de Impulsos de Rede permite a exploração de diferentes soluções em equilíbrio através da manipulação de diagramas recíprocos de forças. Contudo, apesar do processo permitir a determinação do equilíbrio de estruturas através da estática gráfica, ele tem uma desvantagem: é indireto. A conceção da forma requer um elevado grau de abstração, visto que a manipulação do diagrama recíproco de forças horizontais tem repercussões difíceis de pressupor (pois é simetricamente oposto à projeção horizontal da estrutura).

Todavia, um controlo sobre este processo possibilita não só a geração de formas funiculares fascinantes como a análise de estruturas de alvenaria complexas.

A abordagem para esse exame é muito semelhante à criação de novas estruturas. Através das informações sobre a geometria no seu estado atual (os pontos de âncora e a projeção horizontal das arestas de contacto entre aduelas e nervuras), é possível originar um diagrama recíproco que com a função da força vertical originará múltiplas soluções estruturais em equilíbrio.

Caso os dados tenham sido devidamente quantificados e que das várias soluções em equilíbrio haja uma confinada ao núcleo central da seção da estrutura a analisar é possível avaliar, com relativa segurança, que a estrutura é estável.

³⁷ “Tal como a estatística gráfica bidimensional, a Análise de Impulsos de Rede é uma ferramenta holística de desenho e análise. É verdadeiramente uma extensão tridimensional, que permite explorações arquitetónicas estruturalmente informadas, mas também divagações esculturais devido à possibilidade de explorar a indeterminação estrutural. Em vez da procura por uma resposta “certa” para a indeterminação, as variações nas soluções de equilíbrio tornam-se um nível adicional de controle e flexibilidade para o projetista.” Block P. em “Thrust Network Analysis: Exploring Three-dimensional Equilibrium” (2009).



Fig. 52 - Igreja de Sta. Maria de Belém do Mosteiro dos Jerónimos. Lisboa.

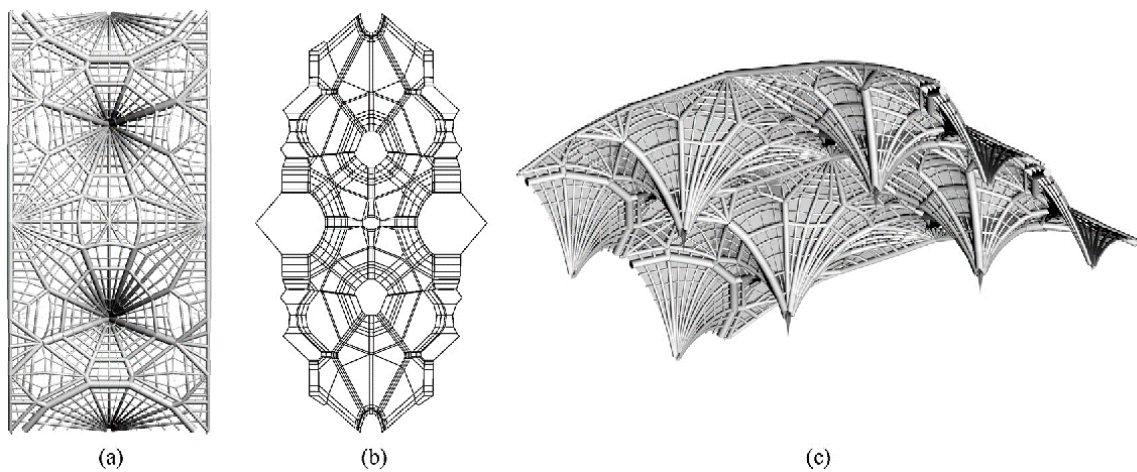


Fig. 53 – (a) Projeção horizontal da estereotomia das abóbadas da nave central da Igreja de Sta. Maria de Belém. (b) Diagrama recíproco de forças. (c) Axonometria da estrutura resultante. Este modelo pode ser comparado à atual estrutura e assim verificar se essa é a solução de forças que permite o seu equilíbrio. (Block P. e Lachauer L.)

Parte III

4. Implementação

“These changes are interesting in light of the idea that architecture is an artistic expression of the spirit and the sense of time, as there is an obvious correlation between the shapes of shells and the time period.”³⁸

Mutsuro Sasaki

Veremos ao longo deste capítulo diferentes sistemas construtivos e materiais que permitiram a implementação de estruturas antifuniculares. Para tal, procurar-se-á entender os seus fundamentos, vantagens e desvantagens através de uma análise célere sobre o seu desenvolvimento ao longo da História.

Nem todos os exemplos elegidos são consequentes de formas que possuem apenas esforços axiais de compressão. Contudo, todos eles são resultantes de métodos construtivos, materialidades ou formas cuja compreensão é elementar para a implementação de estruturas antifuniculares.

Quer seja para espaços comunitários de grande extensão, quer seja para espaços íntimos de pequena dimensão, é possível utilizar estruturas antifuniculares. Contudo, ao longo deste capítulo, será dada uma especial atenção às estruturas que acarretam um maior desafio, as estruturas de grande vão.

A reunião de um grupo de pessoas num espaço coberto é uma necessidade antiga, tão antiga quanto a organização da humanidade em coletivo. Nestes lugares, é necessário evitar a utilização de colunas ou qualquer outro elemento divisório - a unidade é a fundação do espaço comunitário.

Neste sentido, serão explorados três processos construtivos que foram, ou poderão vir a ser cruciais para a construção de coberturas de grande vão comprimidas: as abóbadas de tijoleira, as cascas de betão e os moldes de tecido.

³⁸ “Essas mudanças são interessantes à luz da ideia de que a arquitetura é uma expressão artística do espírito e do sentido de tempo, pois há uma correlação óbvia entre as formas das cascas e o período temporal.” Sasaki M. em “Shell Structures for Architecture, Form Finding and Optimization” (2014) de Adrienssens S., Block P., Veendaal D., Williams C.

4.1 Abóbadas de tijoleira

“La bóveda tabicada es el elemento más precioso de nuestra construcción: permite ejecutar con simplicidade y rapidez las formas más complejas, no exige cimbras y tiene gran resistência en relación com su ligeireza.”³⁹

Antoni Gaudí

O património arquitetónico de estruturas que resistem essencialmente a esforços de compressão é formado por diversos sistemas construtivos, entre eles, os sistemas de alvenaria. Existem múltiplas técnicas de construção em alvenaria, contudo, poucas serão tão eficientes quanto a abóbada de tijoleira (também conhecida em Portugal por abobadilha ou abóbada alentejana (apesar de não ter origem no Alentejo)).

Quando comparada à tradicional abóbada de pedra ou tijolo, a abóbada de tijoleira é revolucionária, tanto pela economia material como pela velocidade construtiva. Ela distingue-se em quatro aspetos:

- A abóbada de tijoleira é uma casca extremamente fina, leve e resistente constituída por várias fiadas de tijoleira (cada uma com cerca de 2cm) que, dispostas em sentidos distintos, formam no conjunto uma secção média de 6 a 10cm;
- As juntas da primeira camada de tijoleira são argamassadas com gesso o que, devido ao seu rápido endurecimento, permite o assentamento “imediato” das peças.
- A sua construção não requer quaisquer suportes (cimbres ou escoras) devido à leveza da tijoleira e ao endurecimento quase instantâneo do gesso;
- Os impulsos horizontais da abóbada são muito inferiores a qualquer outro sistema de alvenaria, permitindo assim, a redução do volume e carga dos elementos que transportam os seus esforços para os apoios (paredes, contrafortes, pináculos, arcobotantes, etc.);

³⁹ “A abóbada de tijoleira é o elemento mais precioso da nossa construção pois permite executar com simplicidade e rapidez as formas mais complexas, não exige cimbra e tem grande resistência em relação à sua ligeireza.” Gaudí A. (1926) conforme citado por Martínez E. em “La bóveda tabicada en España en el siglo XIX: la transformación de un sistema constructivo” (2013).

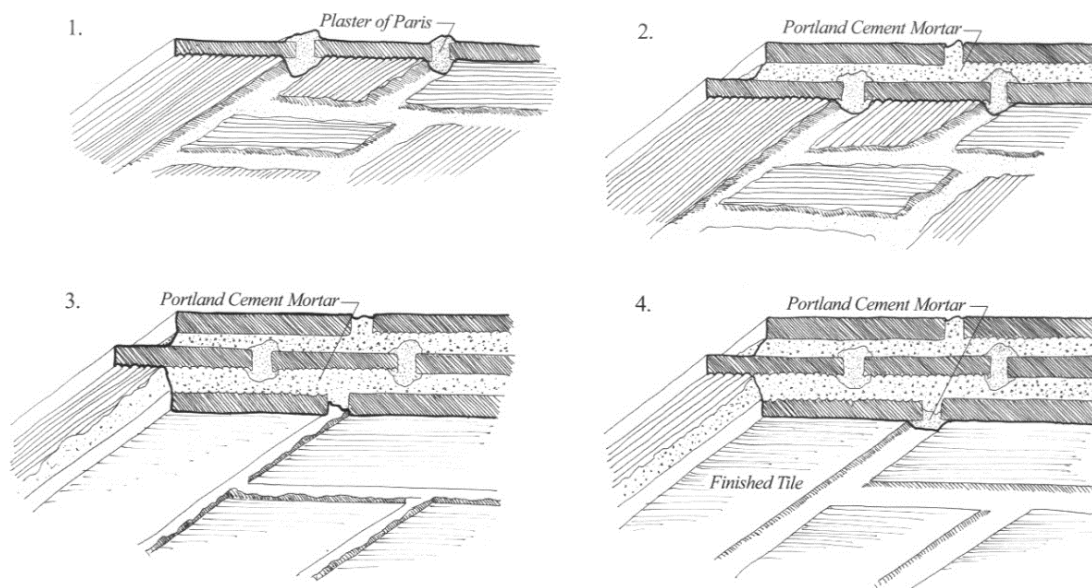


Fig. 54 – Quatro estágios da construção da abóbada tijoleira. Até ao aparecimento do cimento (no século XIX) o aglomerante utilizado em todas as fiadas de tijoleira era gesso. Contudo, com o seu advento, o cimento começou a ser utilizado nas camadas subsequentes à primeira.

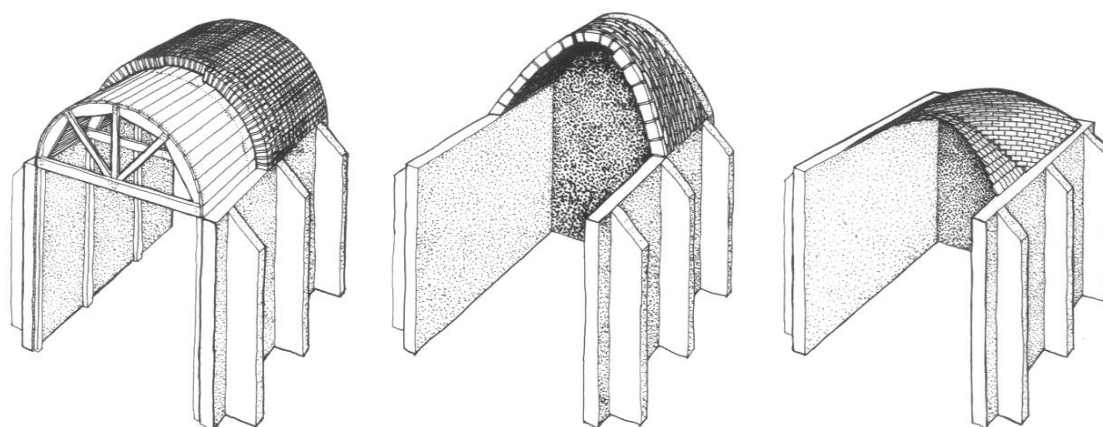


Fig. 55 – Três tipos de abóbadas de alvenaria. Da esquerda para a direita: a abóbada de arco-perfeito (com cimbres), seguida da abóbada núbia (que pela forma e inclinação das aduelas não requer a utilização de cimbres), e, por último, a abóbada de tijoleira (que pela leveza e rápido endurecimento do gesso não exige quaisquer suportes).

Embora seja incerta a origem da abóbada de tijoleira os primeiros exemplos registados provêm do norte de África e Médio Oriente (século XI e XII). Naturalmente, a técnica não surgiu per si, mas da comunhão de várias tradições construtivas que existam ao redor do Mar Mediterrâneo como: as armaduras de ladrilhos das abóbadas romanas, as abóbadas sem cimbres bizantinas, as abóbadas de tubos ocos, as abóbadas núbias e as construções islâmicas com gesso e ladrilho.

Com a expansão territorial árabe, a construção de abóbadas de tijoleira disseminou-se no sul da Europa (principalmente em Espanha, França, Itália e Portugal), sendo Espanha o epicentro deste desenvolvimento (devido ao longo período sob domínio árabe (de 711 a 1492) e à existência abundante de gesso na área oriental da Península Ibérica).⁴⁰

Ao longo do século XIV, em Espanha, as abóbadas de tijoleira foram adotadas pelos cristãos em catedrais góticas. Contudo, elas não eram utilizadas como sistemas estruturais autónomos, mas para colmatar os vazios entre as nervuras de pedra. É o exemplo da sala capitular e claustro do Convento de Santo Domingo de Xàtiva (1329 a 1360), da Capela dos Jofres e claustro do Convento de Santo Domingo de Valencia (1368) e da Igreja de San Juan del Mercado de Valencia (1368).



Fig. 56 - Claustro do convento de Santo Domingo de Valencia (1368).

⁴⁰ Para uma pesquisa mais profunda sobre a origem do sistema construtivo e o seu desenvolvimento em Espanha ao longo do século XIX aconselha-se a leitura de “La bóveda tabicada en España en el siglo XIX: la transformación de un sistema constructivo” (2013) de Martínez E.

Em 1382, o rei de Aragão Pedro IV (o Cerimonioso) escreve uma carta ao responsável pelas obras do palácio de Aljafaría de Zaragoza onde reconhece pela primeira vez as qualidades do novo sistema construtivo.

“Merino: fem vos que saber que nos habem començat de fer obrar el real de Valencia e havem trobada una obra de guix e de rejola fort e profitosa, fort espeegada e de pocha messio, per que us manam que façat venir Farayg e un dels millors maesters que y sien per tal que vegen aquesta obra como se fa e que semblant la puscats fer aqui, e si vos voliets e podiets venir ab ells per regonexer la dita obra e veure la a ull, fariet nos en gran plaer e servey.”

Rei Pedro IV⁴¹

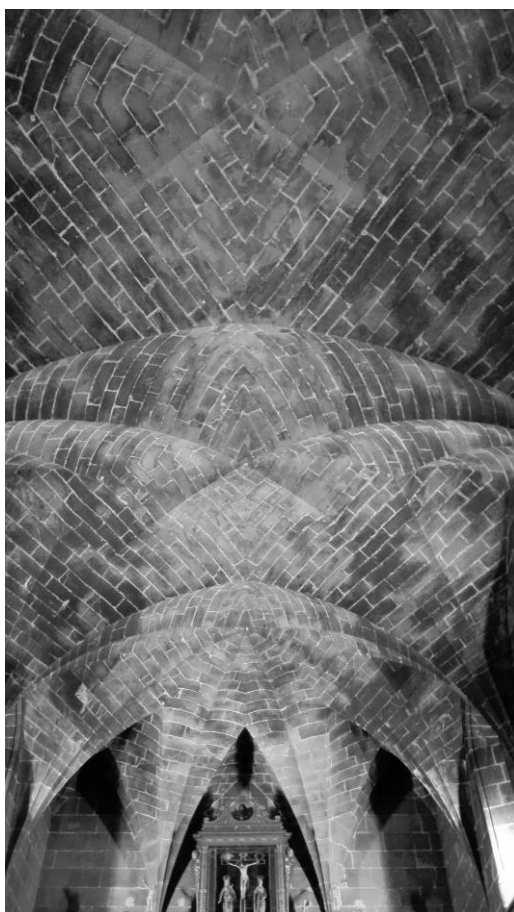


Fig. 57 – Capela da rainha Maria no convento da Trindade em Valencia.

Como exposto, a maioria dos exemplos de abóbadas de tijoleira dos séculos XIV e XV servem para preencher os vazios entre as nervuras de pedra. Contudo, a partir da segunda metade do século XV, surgem exemplos de abóbadas cruzadas completamente executadas em tijoleira. É o caso da capela da rainha Maria no convento da Trindade em Valencia.

Entre o século XVI e o século XVIII a técnica dissemina-se por Espanha (incluindo pelas antigas colónias na América do Sul) e pelos países contíguos (principalmente França, na zona de Rossilhão e Portugal, na zona do Alentejo e Algarve). No entanto, continua a ser em Espanha que a técnica cresce com maior preponderância.

⁴¹ “Merino: informamos que iniciámos as obras no real [palácio] de Valência e achámos uma obra de gesso e tijolo muito rentável, presumivelmente forte, muito leve e de baixo custo, e por esse motivo pedimos que envie Farayg e um dos melhores mestres para que eles possam ver como esse trabalho é feito e reproduzi-lo de maneira semelhante, e se quiser e puder acompanhá-los para reconhecer a dita obra e vê-la com os seus próprios olhos, isso nos daria grande prazer e serviço.” D. Pedro IV ao Merino de Zaragoza. O documento original encontra-se no Arquivo da Coroa de Aragão em Barcelona.

Durante este período as abóbadas de tijoleira começam a ser aplicadas em diversos estilos estéticos (Renascimento, Barroco e Neoclássico) e geometrias baseadas no arco de volta perfeita.

As abóbadas de tijoleira têm um importante papel na transição entre as abóbadas de arcos quebrados góticos para as abóbadas de arcos perfeitos clássicos pois os últimos provocam impulsos horizontais maiores, solicitando assim a utilização de abóbadas mais leves que permitam o fluxo dos esforços para as fundações sem abdicar da ligeireza dos seus apoios. Além da aplicação da tijoleira em abóbadas, começam a surgir escadarias e outros elementos estruturais do material.

Igualmente importante para a disseminação da abóbada de tijoleira entre o séc. XVIII e o séc. XIX, é a difusão do sistema construtivo em distintos tratados arquitetónicos franceses.⁴²



Fig. 58 - Construído no final do séc. XV o Hospital General de Valencia é um importante exemplo que marca a evolução da abóbada de tijoleira. As coberturas do hospital eram inicialmente de madeira. Porém, em 1545, o hospital sofreu um incêndio que levou à sua destruição e reconstrução. Devido ao dano do desastre, a rápida reconstrução foi feita através dum sistema incombustível - a abóbada de tijoleira.

⁴² Dois tratados importantes dedicados à construção de abóbadas de tijoleira foram “Manière de rendre toutes sortes d’édifices incombustibles, ou Traité sur la Construction des voutés, faites avec des brics et du plâtre, dites Voutes plate” (1754), escrito por Comte d’Espie e o último capítulo do “Cours d’Architecture” (1771 e 1777) por Blondel F. e Patte P.

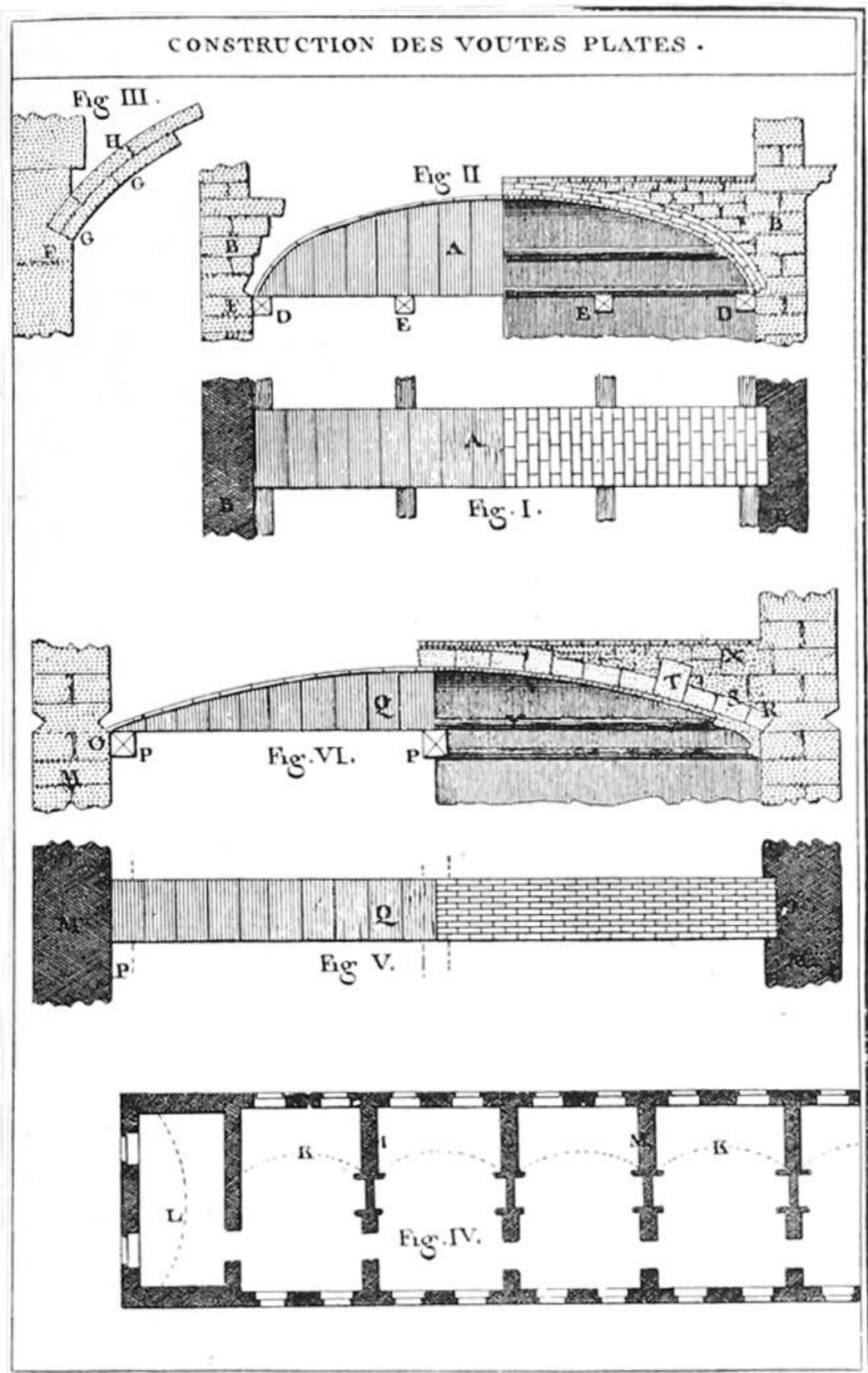


Fig. 59 – Construção de abóbadas de tijoleira (Blondel e Patte, 1771-1777). Apesar da importância para a difusão do processo construtivo, os tratados de *Compte d’Espie*, e de Blondel e Patte, difundiram opiniões incorretas sobre os seus princípios estruturais. Nomeadamente, a ideia de que as cascas de tijoleira atuavam de forma “monolítica” e que não geravam qualquer impulso horizontal.

Até meados do século XIX vão surgindo algumas evoluções no sistema construtivo. Contudo, no desenrolar da Revolução Industrial, surge uma evolução conceptual, formal e construtiva sem precedentes:

- Com o advento do cimento, este passa a ser utilizado em todas as camadas subsequentes à primeira camada de gesso. Esta inovação colmata duas desvantagens da anterior aplicação do gesso em todas as fiadas: o gesso não suporta a humidade, o que impossibilitava a utilização do sistema em ambientes exteriores; e o gesso tem um coeficiente de dilatação elevado, o que provocava uma degradação acelerada da estrutura;

- Até meados do séc. XIX, o ferro era um material auxiliar (utilizado para ferramentas, uniões, correntes e, em situações particulares, tirantes). Porém, neste período, o ferro forjado e, mais tarde, o aço começaram a ser industrialmente fabricados. Isto possibilitou a implementação massiva dos metais na construção como elemento decisivo à estabilidade estrutural de diversos sistemas. No caso das abóbadas de tijoleira, o ferro e o aço surgem nas colunas, vigas e arcos de treliça onde assentam; e em tirantes que impedem os impulsos horizontais produzidos;

- Ao longo do século surgem estudos que unificam as teorias e métodos que permitem a descoberta das linhas de pressão e da estabilidade de sistemas estruturais comprimidos.⁴³ A estática gráfica e as cordas suspensas começam a ser exploradas não só para a validação estrutural mas também para a criação de geometrias antifuniculares;

Estas evoluções surgem numa altura em que urge a vontade de industrialização e a necessidade de criar espaços de grande dimensão, como armazéns, fábricas, estações ferroviárias, etc. Além da conceção de vastas áreas para o desenvolvimento da indústria e transporte, também surge um investimento na criação de espaços extensos de cariz público (como tribunais, hospitais, museus, escolas, salas de concertos, pavilhões desportivos, etc.).

⁴³ Entre os séculos XIV e XIX, as abóbadas de tijoleira eram desenhadas com ferramentas euclidianas (régua e compasso) através de um sistema de proporções preciso. As regras de Fray Lorenzo (1639) e de Josep Reinart (1810) foram as mais utilizadas. Contudo, entre 1830 e 1840 surgiu simultaneamente em França (M. E. Mery), Inglaterra (Henry Moseley) e Alemanha (Franz Gerstner) teorias sobre o funcionamento das linhas de pressão. Após a teoria, entre 1840 e 1870 surgiram investigações sobre como aplicá-las, o que desenrolou, na consolidação prática da estática gráfica (através de William Barlow, George Snell, Herman Scheffler, William Rankine e Karl Culmann).

Durante a Revolução Industrial, na Catalunha, a abóbada de tijoleira formou algumas das suas estruturas mais originais. O modernismo catalão une dois alentos essenciais: a procura pela novidade científica e o romantismo nacional. Estes princípios manifestaram-se também na escolha por materiais e técnicas características, nomeadamente, nas abóbadas de tijoleira (que na Catalunha é apelidada de “volta catalana”). Este sistema manifesta-se nas obras de vários arquitetos, entre eles: Rafael Guastavino (1842-1908) e Rafael Guastavino Jr. (1872-1950), Antoni Gaudí (1852-1926), Lluís Muncunill (1868-1931) e Cèsar Martinell (1888-1973).

De origem valenciana e formação académica catalã, Rafael Guastavino iniciou o seu vasto percurso com a abóbada de tijoleira em duas obras essenciais: a Fábrica Batló (1868) com Alejandro Mary em Barcelona e o teatro La Massa (1881) em Vilassar de Dalt. Estas viriam a ser as primeiras de um vasto legado de obras que Guastavino e, mais tarde o filho, viriam a dirigir nos E.U.A.⁴⁴



Fig. 60 – O teatro La Massa foi o primeiro projeto de Guastavino com uma estrutura de grande vão em abóbada de tijoleira. A abóbada tem 17 metros de diâmetro, por 3 metros de flecha e um óculo de 4 metros de diâmetro. A secção mínima tem apenas 5cm e possui nervuras interiores de 10cm de espessura. O impulso vertical da abóbada é suportado por colunas de ferro fundido ao redor da sala e os impulsos horizontais são contrariados por uma cinta metálica tracionada.

⁴⁴ Para uma pesquisa mais profunda sobre a história, arte e tecnologia do legado arquitetónico da família Guastavino aconselha-se a leitura de “Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile” (2010) de Oschendorf J.

Em 1881, Rafael Guastavino e o filho mudam-se para os E.U.A. Apesar da ausência de tradição construtiva com abóbadas de tijoleira, a solicitação pela construção em alvenaria era cada vez maior (devido ao crescente revivalismo histórico⁴⁵ e à necessidade de um sistema resistente ao fogo).⁴⁶

Foi a partir desta conjuntura que Guastavino segue a sua trajetória como construtor de abóbadas de tijoleira (ao invés de arquiteto), caminho que viria a ser postumamente continuado pelo filho, Rafael Guastavino Jr. Neste contexto, Guastavino registra as primeiras patentes do sistema de abóbadas de tijoleira nos E.U.A (1885), cria a companhia “Fire-proof Construction” (1889) e a fábrica de cerâmica que viria a ser conhecida por “La Cerámica” (1907).

Entre os múltiplos edifícios públicos construídos destacam-se: a Biblioteca Pública de Boston (1889) em cooperação com a firma de arquitetos Mckim, Mead and White; a City Hall Subway Station de Nova-Iorque (1904) com os arquitetos Heins & LaFarge e a Queensboro Bridgemarket (1909) com Henry Hornbostel.



Fig. 61 –Para a Biblioteca Pública de Boston o arquiteto Charles Mckim visionou uma estrutura de ferro com tetos falsos de abóbadas de tijoleira. Contudo Guastavino persuadiu Mckim sobre a resistência estrutural das abóbadas de tijoleira. Na fotografia podemos ver Rafael Guastavino em cima de um arco das abóbadas (à direita).

⁴⁵ Devido à apropriação de estilos antigos em obras públicas e à estreita colaboração entre arquitetos e artistas, o período entre 1876 e 1917 foi cunhado de “Renascimento Americano”.

⁴⁶ Em 1871, o grande incêndio de Chicago destruiu 10km² da cidade e em 1872 o fogo de Boston arruinou mais de 700 edifícios.

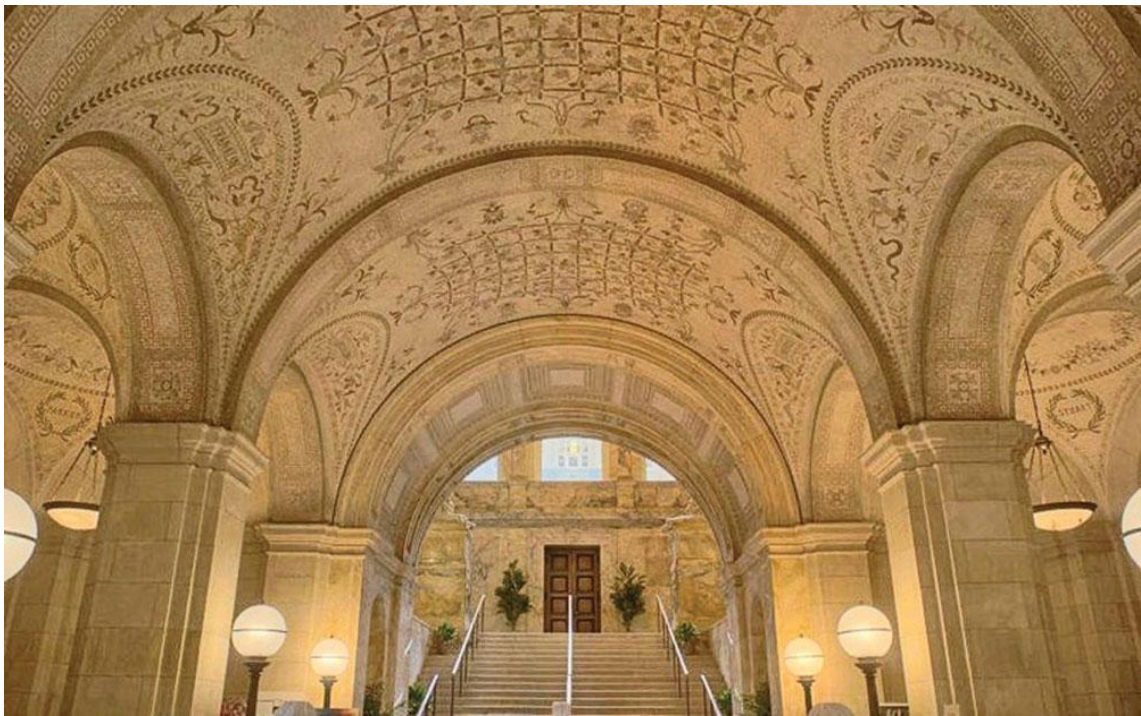


Fig. 62 – Nas duas perspetivas sobre a Biblioteca Pública de Boston (1889) verificamos a distinção estética entre o tratamento das abóbadas tesseladas de mosaicos do átrio principal e as abóbadas “cruas” da sala de leitura.

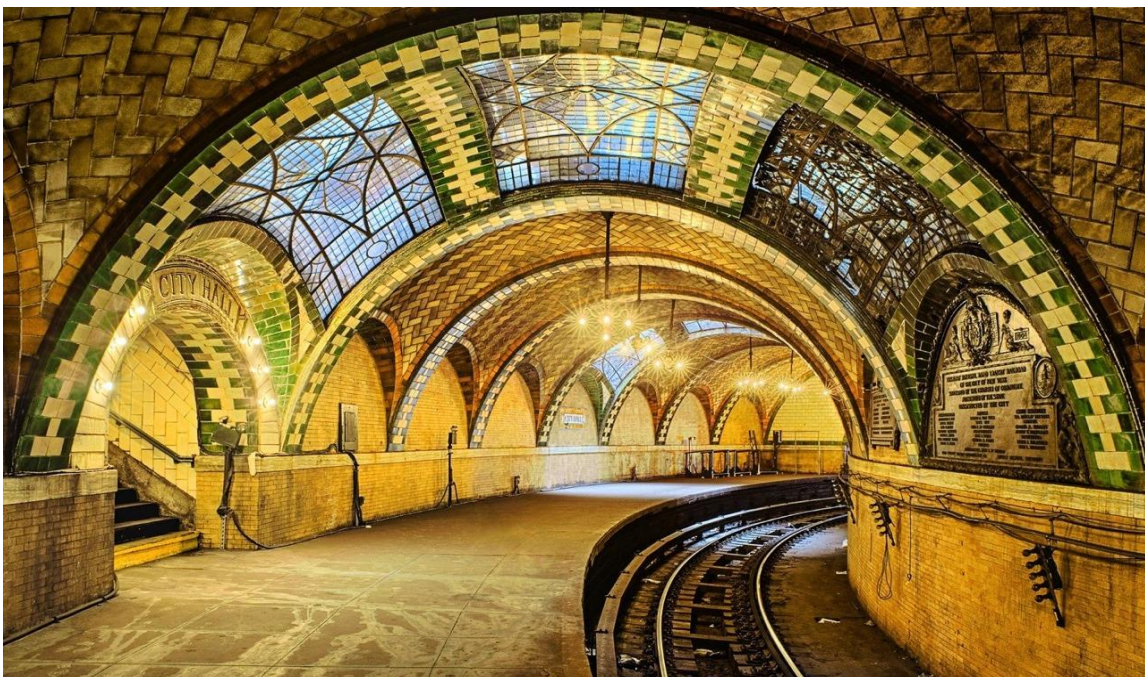


Fig. 63 –O projeto da City Hall Subway Station de Nova-Iorque serviu de terminal para a primeira linha metropolitana de Nova-Iorque. Embora já não possa acomodar os novos comboios esta construção permanece em excelente estado de conservação. A sua dinâmica espacial e estética resulta da combinação dos padrões cromáticos e geométricos das abóbadas de tijoleira vidrada de Guastavino (possível através do controlo sobre a manufatura e acabamento das suas cerâmicas) com as claraboias, candeeiros e baixos relevos desenhados por Heins & LaFarge.

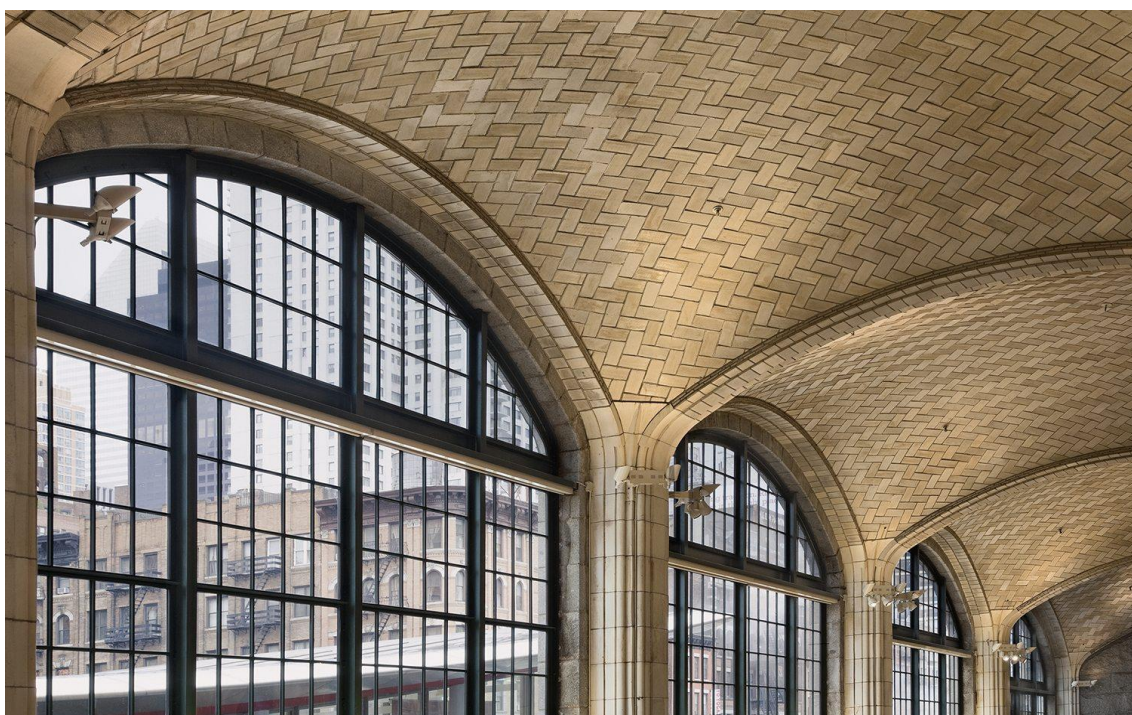
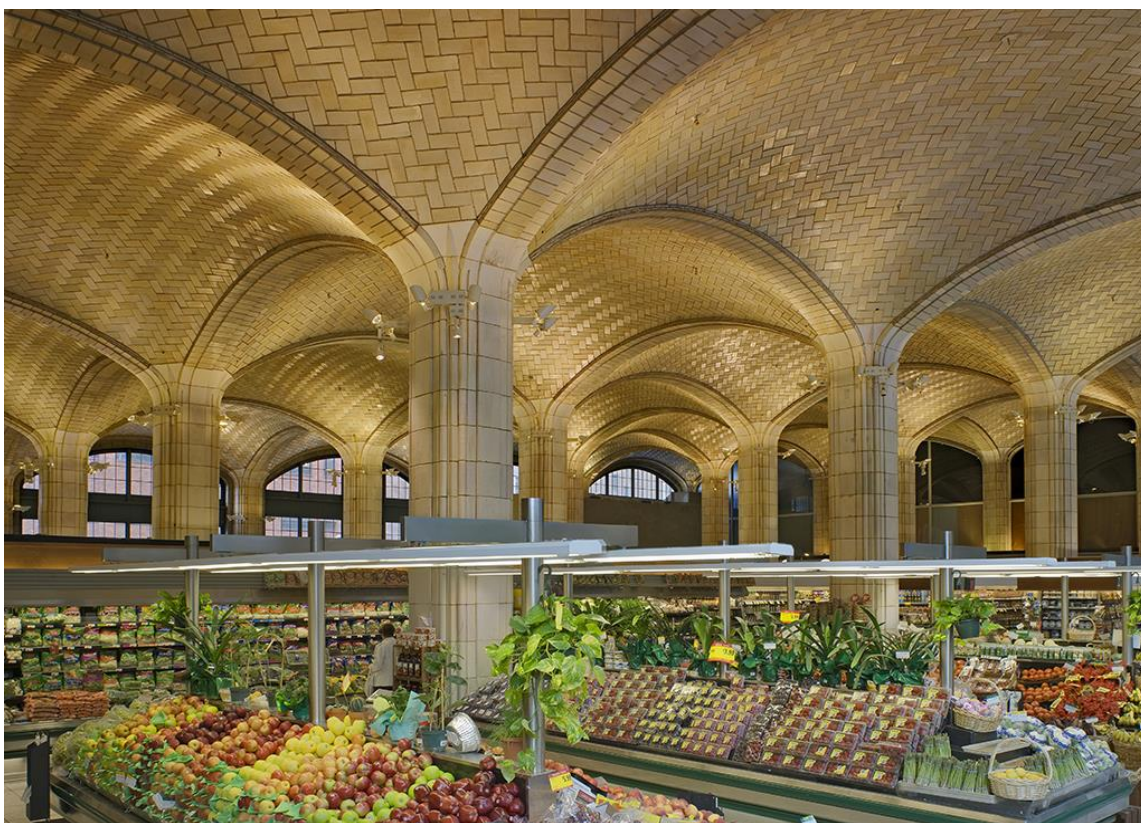


Fig. 64 – A alta arcada abobadada do Queensboro Bridgemarket transformou a grelha ortogonal de colunas num conjunto harmonioso de curvas sinuosas que transmitem uma clara e iluminada plenitude.

Rafael Guastavino Jr. ocupou o cargo da companhia pouco antes do falecimento do seu pai em 1908. Embora possa parecer que existe pouca diferença entre a obra de pai e filho, Guastavino Jr. implementou diversas inovações.

A partir de 1908, com a construção da catedral de St. John the Divine, Guastavino Jr. começa a conceber e analisar os seus projetos através do fluxo de forças. Enquanto que Guastavino Sr. concebia através da geometria euclidiana e da intuição,⁴⁷ Guastavino Jr. analisava e modificava as suas estruturas através de polígonos funiculares. Isto permitiu construir cascas ainda mais rigorosas, esbeltas e extensas que as do seu pai.

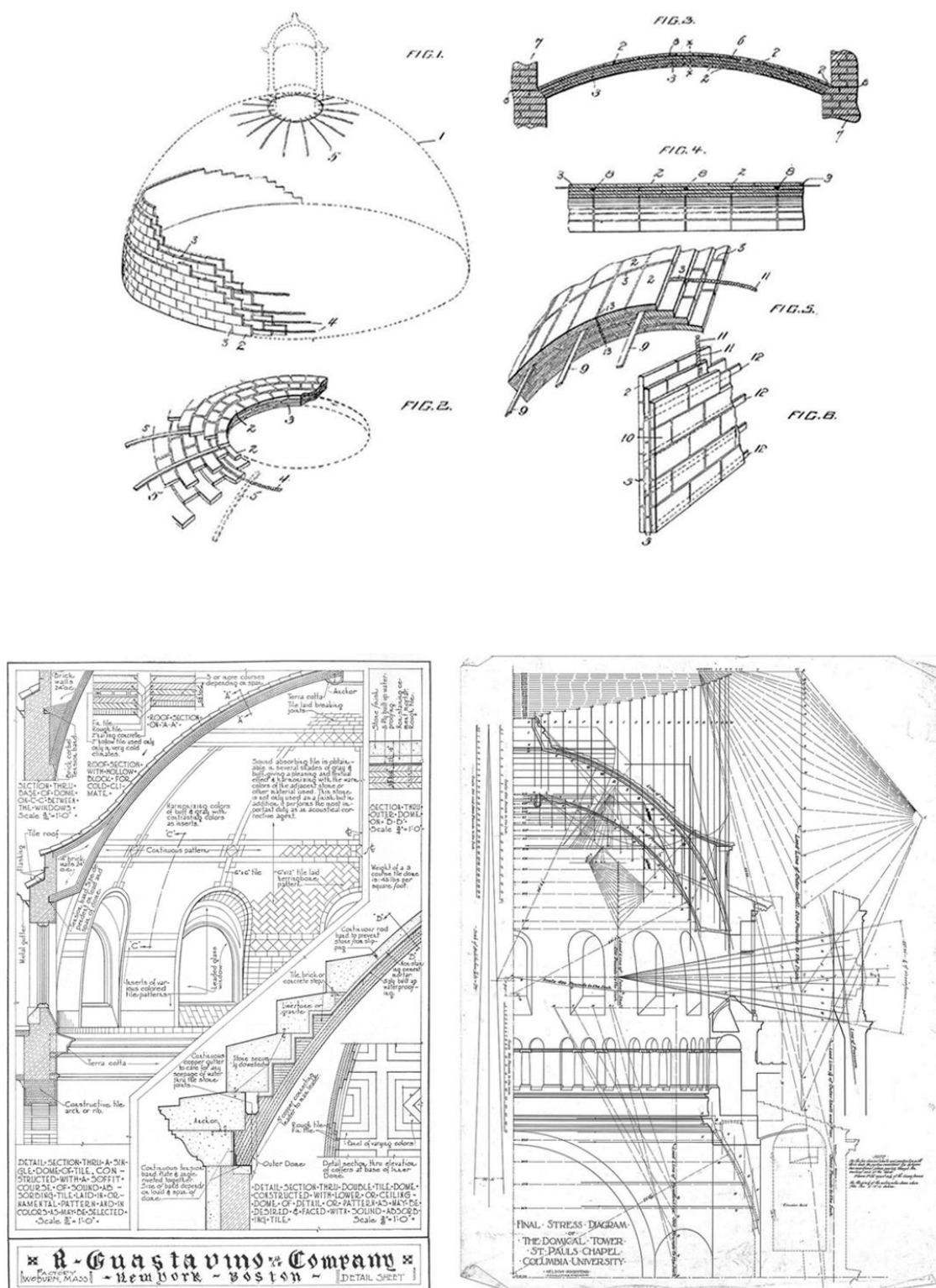
Além das inovações estruturais, Guastavino Jr. melhorou as propriedades acústicas das tijoleiras. Para tal, em colaboração com Wallace Sabine, criou dois modelos de cerâmica (a “Rumford tile” e a “Akoustolith tile”). Os poros destas tijoleiras absorviam o som com tal eficácia que em diversas igrejas e espaços performativos decidiram tapá-los, pois absorviam demasiado o som. Não obstante o uso destas em espaços públicos como museus e estações permitiu uma quietude invulgar nestes lugares.

A partir dos anos 30, assistiu-se a uma deturpação do uso da abóbada de tijoleira nos E.U.A. Em vez das abóbadas continuarem a ser usadas como um sistema estrutural económico, elas tornaram-se um modelo dispendioso de acabamento interior. Esta transição ocorreu devido à introdução de cascas de betão e à progressiva transição entre a curva dos estilos Revivalistas e Art Deco pela ortogonalidade do Estilo Internacional.

O declínio da companhia fez-se sentir na produção da fábrica (em 1910 eram produzidas 20 vezes mais do que em 1940) e em 1943 Rafael Guastavino Jr. decide vender a companhia.

Apesar do fim, em poucas décadas, a família Guastavino construiu diversas abóbadas de tijoleira que hoje fazem parte do património arquitetónico dos E.U.A.

⁴⁷ Na prática, as construções de Guastavino Sr consideraram os impulsos horizontais, contudo, na teoria, Guastavino Sr defendia que as abóbadas de tijoleira são construções coesas e monolíticas que não geram impulsos horizontais. Guastavino Sr. expressa esta conceção em “Essay on the theory and history of Cohesive Construction” (1892).



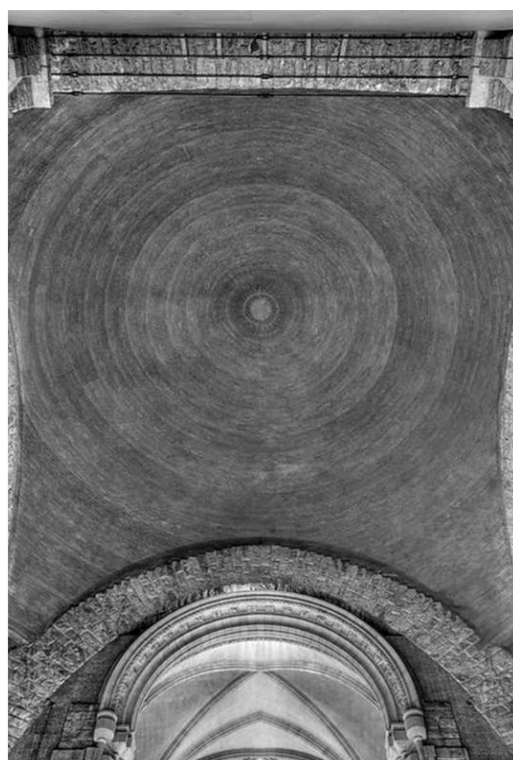


Fig. 66 – Até então, a cúpula da catedral neogótica de St. John the Divine foi construída mais rapidamente (15 semanas) e a um custo muito inferior do que qualquer outra estrutura do mesmo tamanho. De base quadrangular, a casca possui um comprimento diagonal de 41 metros apesar da sua espessura mínima possuir apenas 11cm. Esta foi a primeira estrutura onde a companhia utilizou armações metálicas entre as fiadas de tijoleira (localizadas nas áreas de maior tensão).⁴⁸

⁴⁸ Embora Guastavino Jr. tenha patenteado o sistema nos E.U.A (1910), as abóbadas de tijoleira armada já tinham sido patenteadas em França no séc. XIX.

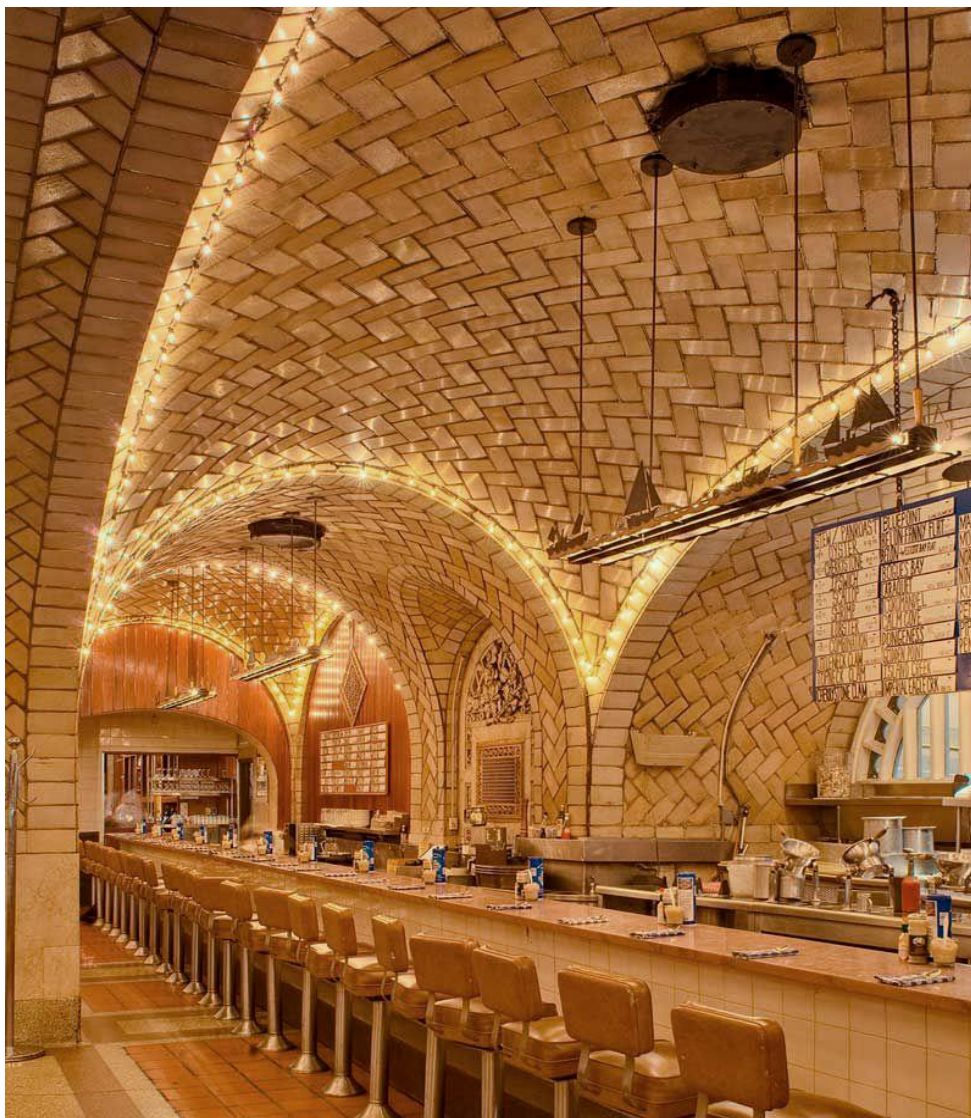
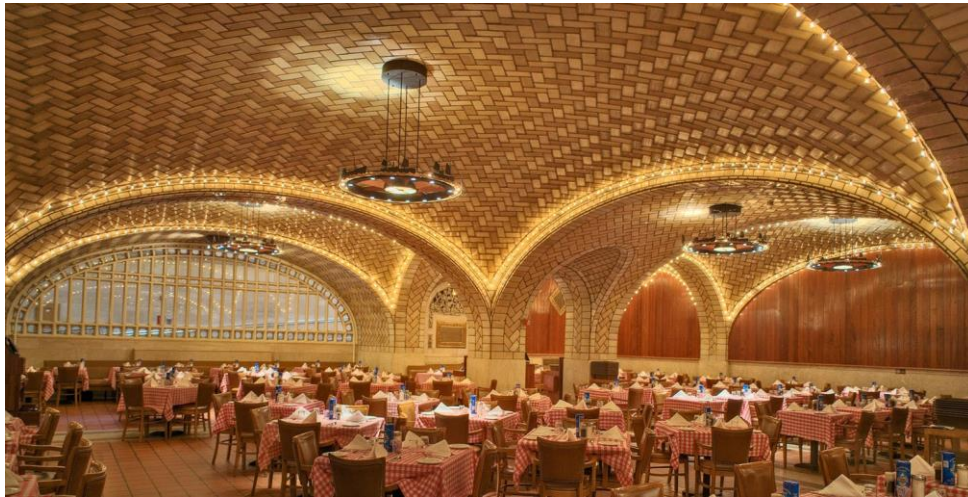


Fig. 67 –A estrutura da “Oyster Bar” (1912; para Warren&Wetmore) é composta por uma dúzia de abóbadas de tijoleira vidrada de flecha rasa que transmitem uma elegante, profusa e confortável ambiência ao espaço interior.

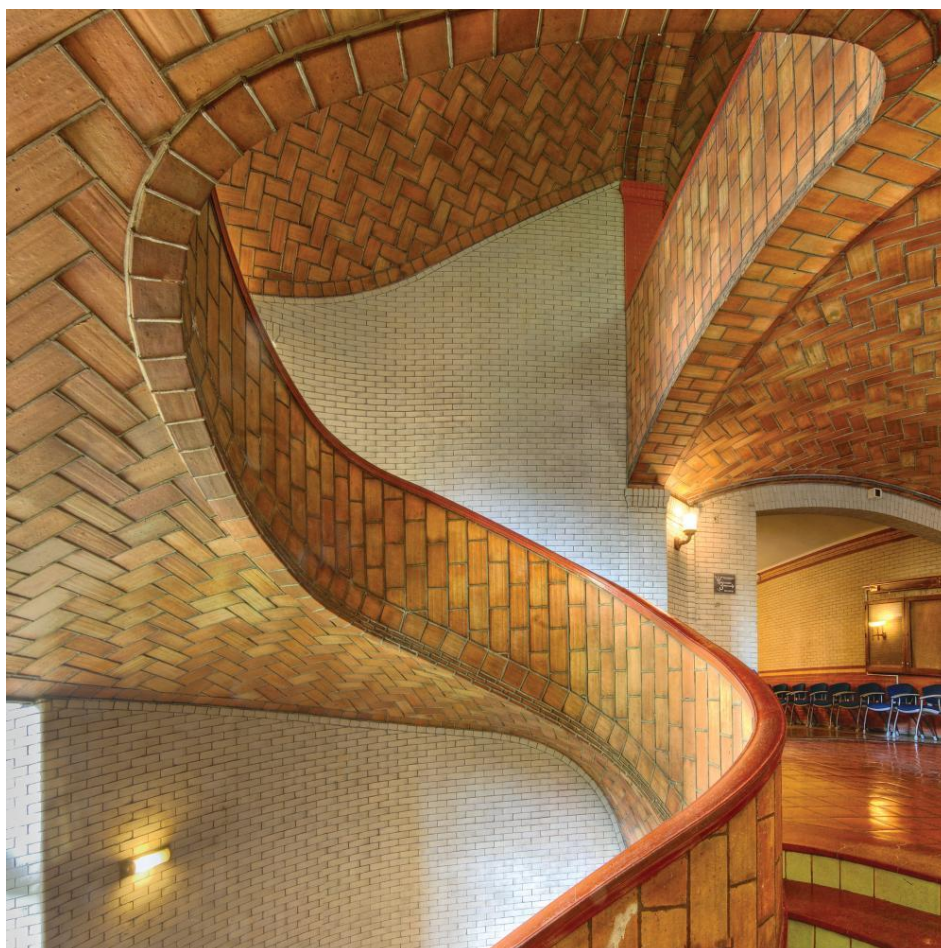
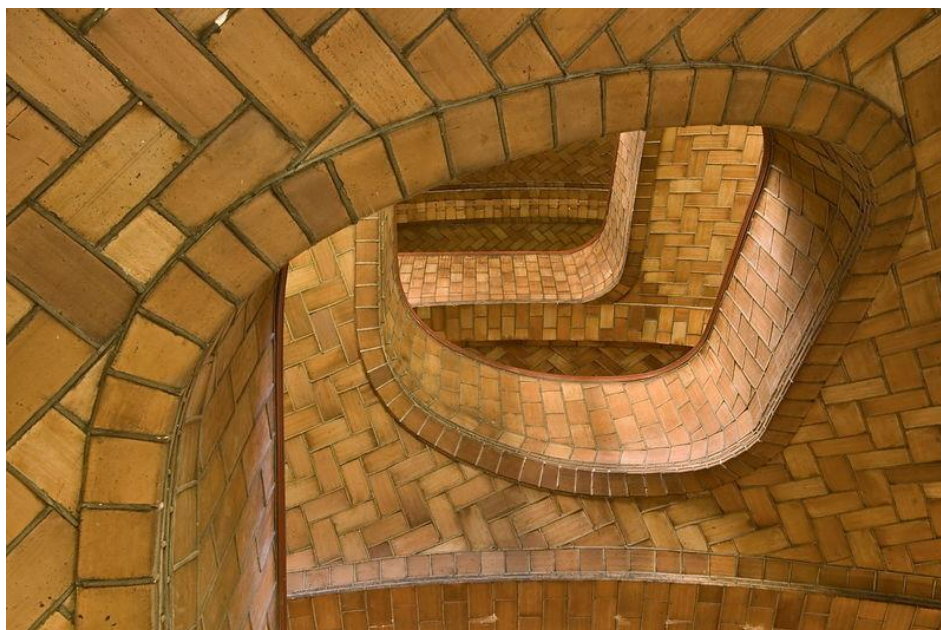


Fig. 68 –A geometria, textura e disposição espacial das escadas abóbadas da Carnegie Mellon University em Pittsburgh (1913) demonstram o perfeccionismo estético e estrutural das abóbadas de tijoleira de Rafael Guastavino Jr.



Fig. 69 – Poster publicitário com algumas das maiores cúpulas construídas pela companhia (1910).

Enquanto Guastavino Sr. integrara o sistema nos E.U.A, na Catalunha despontaram várias estruturas que deram novos desígnios às abóbadas de tijoleira. Um dos arquitetos mais inventivos deste período foi Antoni Gaudí.

Gaudí foi o primeiro a conceber estruturas através da estática gráfica e de modelos tridimensionais funiculares (ver capítulo 2.2). Com estes processos, projetou abóbadas de tijoleira absolutamente concordantes com o esforço que suportam melhor, a compressão.

Com a função original de lavandaria, o sótão que coroa a Casa Mila (1912) tem uma atmosfera completamente distinta dos restantes espaços. Formada por abóbadas de tijoleira assentes em 270 arcos catenários conectados por vigas serpenteadas a sua estrutura isola o corpo do edifício e evita o excessivo peso no seu topo.⁴⁹ Esta hierarquia de nervuras preenchidas por abóbadas de tijoleira também foi utilizada no sótão da Casa Batlló (1906) e na Igreja da Colónia Güell (1914).

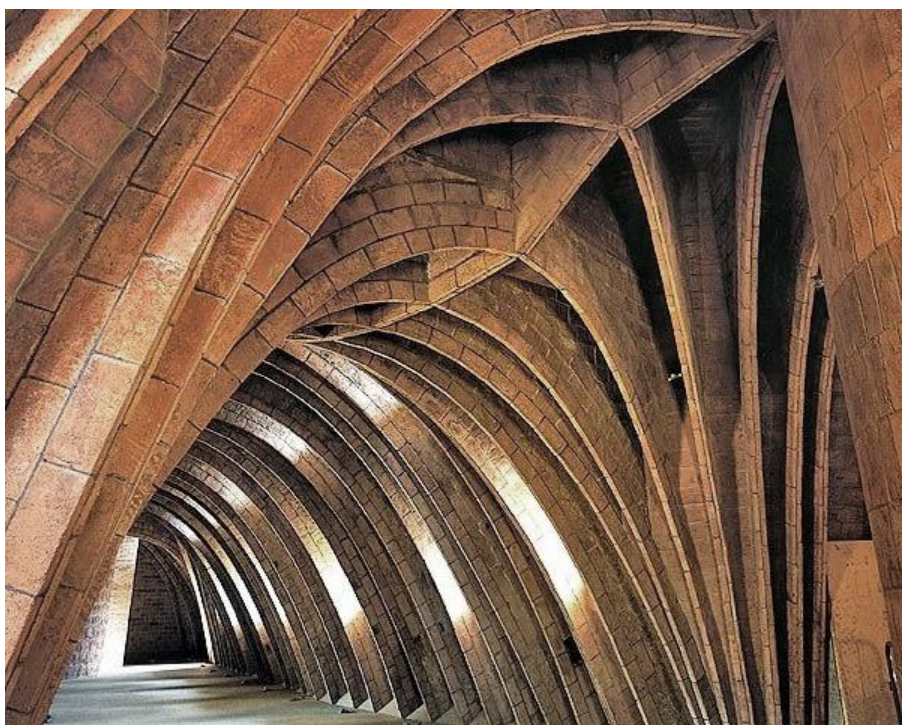


Fig. 70 – O sótão da Casa Mila (1912) é composto por arcos catenários com diferentes flechas, luz e direções que, em conjunto, geram uma ondulante sequência que evoca o esqueleto de uma gigante cobra em movimento. Tanto os arcos como as abóbadas são formados por diferentes fiadas de tijoleira.

⁴⁹ Além de estruturalmente suficiente o arco da catenária é leve e fácil de construir (Gaudí utilizou uma corda suspensa para desenhar os cimbres de madeira que suportaram os arcos durante a sua construção).



Fig. 71 - O sótão da Casa Batlló (1906) é um espaço sereno, elegante e luminoso construído com uma série de arcos catenários e abóbadas de tijoleira rebocados. A modelação do reboco arredondou os cantos oferecendo um agradável toque e uma leve transição lumínea entre as suas faces.

A Igreja da Colónia Güell foi realizada entre 1908 e 1914 para o bairro operário de Santa Coloma de Cervelló. Foi nela que Gaudí explorou pela primeira vez os modelos tridimensionais com cordas funiculares e ensaiou inúmeras técnicas construtivas fundamentais para a criação do Templo Expiatório da Sagrada Família. Entre elas, as abóbadas de tijoleira em paraboloides hiperbólicos.

O projeto que Gaudí visionou para a igreja era composto por duas naves (inferior e superior) coroadas por diversas torres laterais e uma central de 41 metros de altura. Contudo, só foi construída a nave inferior.⁵⁰

A escolha das suas formas, atmosferas, materiais e símbolos está profundamente ligada à admiração religiosa e espiritual que Gaudí nutria pela Natureza. Esta admiração expressa-se:

- Na seleção dos materiais exteriores. À volta da igreja existem pinheiros mansos e com o intuito de imprimir as suas cores e texturas na arquitetura, Gaudí empregou o basalto e o tijolo como principais materiais estruturais.

- Na reutilização de materiais, entre eles: a escória do ferro (subproduto da fundição de minério), agulhas de selfactina (das máquinas de fiação de agulhas de Can Güell) nas grades das janelas, tijolos queimados (provenientes de fornos da zona de Martorell) e a cerâmica em trencadís⁵¹ (de cacos de louça e outras peças de cerâmica desperdiçada) para criar os vários símbolos teológicos que cobrem as abóbadas exteriores e o redor das janelas (facilitando o escoamento das águas).

- E na iluminação interior. Os vitrais das 22 janelas que circundam a igreja foram pintados com formas orgânicas semelhantes a pétalas de flor ou asas de borboleta. Esta

⁵⁰ Em 1914 a família Güell deixou de patrocinar as obras, que foram definitivamente abandonadas no final de 1916.

⁵¹ O trencadís (do catalão trencat, que em português significa quebrado) é uma técnica decorativa que consiste na criação de um mosaico com fragmentos irregulares de cerâmica ou vidro. Normalmente, o trencadís é usada na decoração de superfícies verticais exteriores. As vantagens do trencadís consistem na rápida aplicação, grande espontaneidade criativa e na reutilização de materiais que de outra forma não seriam aproveitáveis. Na Igreja da Colónia Güell o trencadís foi aplicado por Josep Maria Jujol.

iluminância variável e policromática cria um dinâmico jogo com a sombra das nervuras interiores da cobertura.

Quanto às abóbadas de tijoleira, a grande inovação desta igreja foi a incorporação de superfícies anticlásticas de paraboloides hiperbólicos (para formar as janelas da igreja e cobrir os vazios entre as nervuras). Em obra, a sua utilização permitiu uma simplicidade construtiva pois a sua forma pode ser facilmente concebida com cordéis entre os arcos.

Tal como o sótão da Casa Mila, o interior da Igreja possui uma hierarquia estrutural de um esqueleto linear coberto por abóbadas de tijoleira. Contudo, devido à utilização do modelo tridimensional funicular, as formas do esqueleto não são provenientes de simples catenárias, mas de linhas antifuniculares interconectadas com distintas cargas. Embora a estrutura da nave inferior seja autossuficiente, as suas colunas inclinadas foram projetadas para suportar as cargas da nave superior e das diversas torres (nunca erigidas) sem recurso a arcobotantes (tal como a estrutura da Sagrada Família, todas as cargas são transportadas para os elementos interiores).

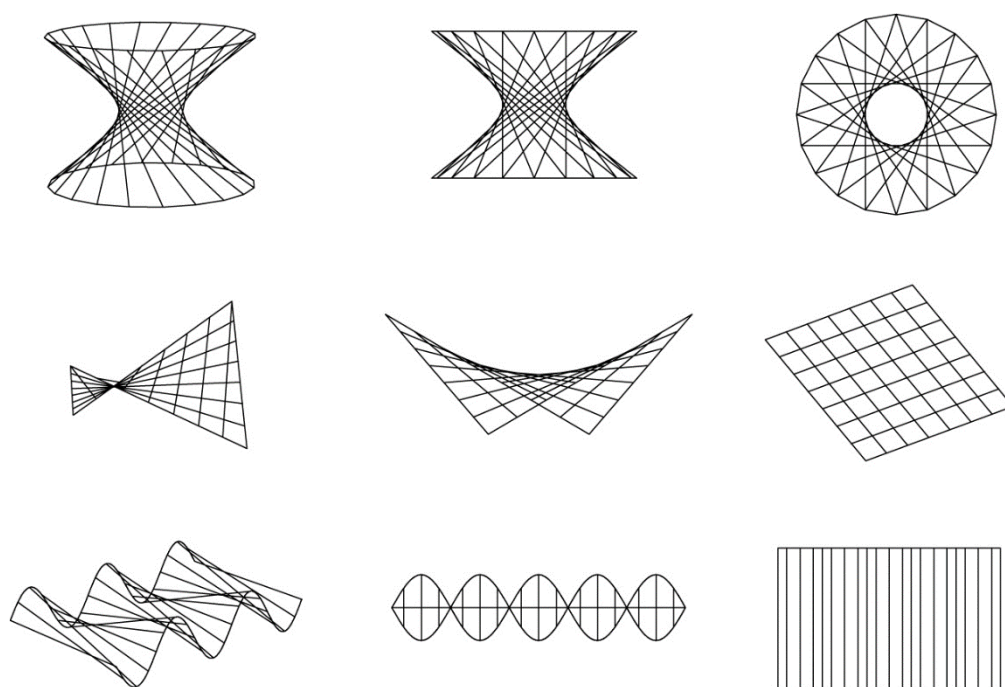


Fig. 72 – Superfícies regradas utilizadas por Antoni Gaudí. Da fila superior para a inferior: o hiperboloide de revolução utilizado nas claraboias de tijoleira da Sagrada Família, o parabolóide hiperbólico utilizado nas abóbadas de tijoleira da Igreja da Colónia Güell e na Sagrada Família e os conoides utilizados na cobertura de tijoleira das Escolas da Sagrada Família. (do autor)

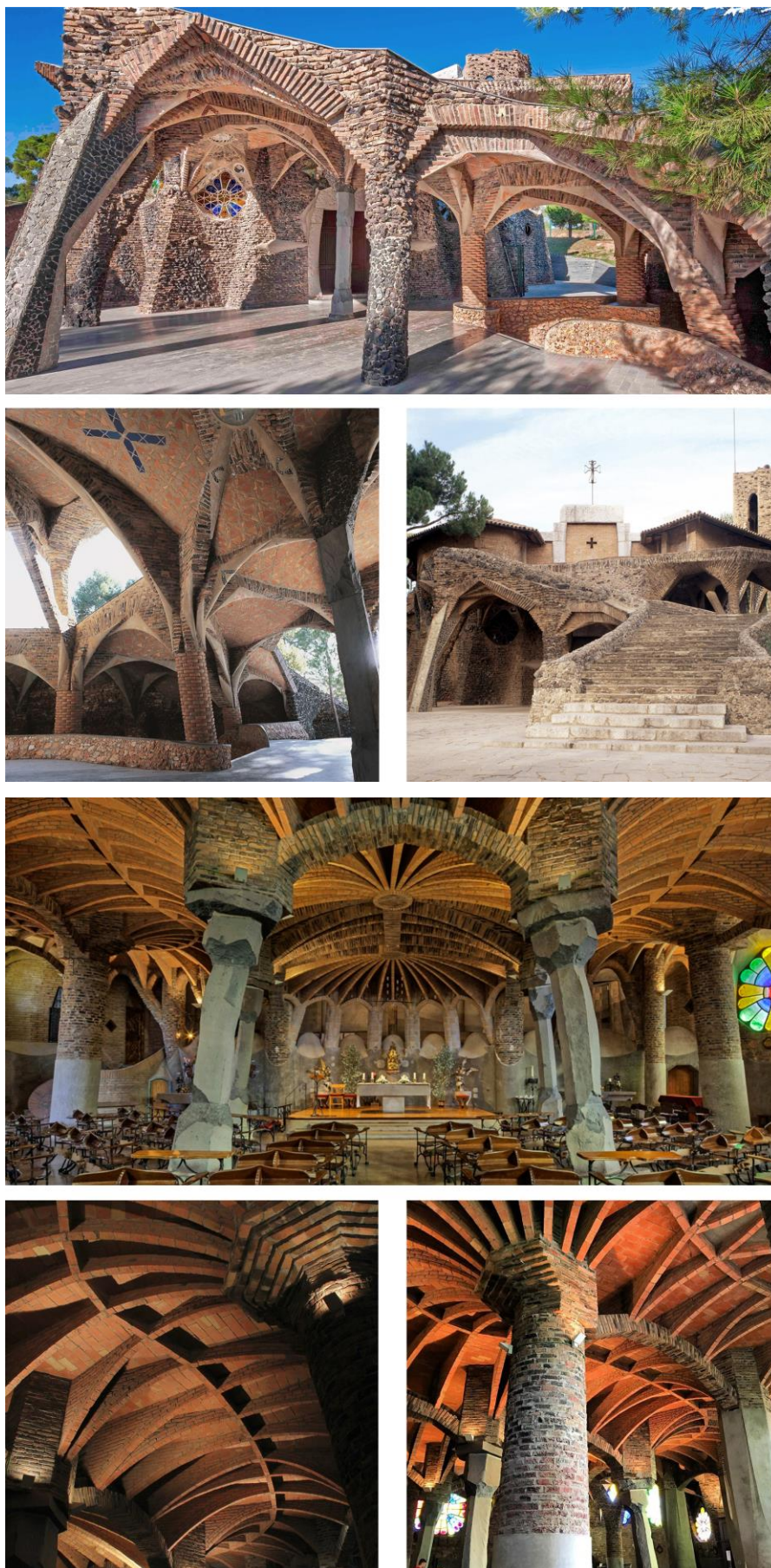


Fig. 73 – Perspetivas exteriores e interiores da Igreja da Colónia Güell.

Situadas perto da fachada da glória, as Escolas da Sagrada Família (1909) apresentam uma outra superfície regradada de abóbadas de tijoleira – os conoides. Tal como os paraboloides hiperbólicos, os conoides são superfícies regradadas geradas pela movimentação de uma linha sobre dois perfis (o que possibilita a criação duma complexa dinâmica espacial com um processo construtivo simples).

Através da estática gráfica e dos modelos funiculares Gaudí criou formas contínuas que acompanham o fluxo das forças e diluem a conceção de uma estrutura como a mera soma de elementos. Na Sagrada Família, é difícil distinguir onde acaba a coluna e surge o arco, onde acaba o arco e surge a abóbada, onde acaba a abóbada e surge a claraboia.⁵²

Ao contrário das catedrais góticas que descarregam os esforços para o exterior (através dos arcobotantes) os templos de Gaudí possuem impulsos horizontais mínimos, o que permite que sejam descarregados para os apoios interiores. Além da redução da quantidade de material, esta eficiência distributiva possibilita a projeção de vãos de grande dimensão cuja entrada de luz não é interrompida por arcobotantes exteriores.



Fig. 74 – Cobertura das Escolas da Sagrada Família (1909).

⁵² Publicado três anos após a morte de Gaudí, o livro “El temple de la Sagrada Família” (1929) de Boada P foi um documento fulcral para a preservação das intenções finais de Gaudí em relação à evolução do projeto.

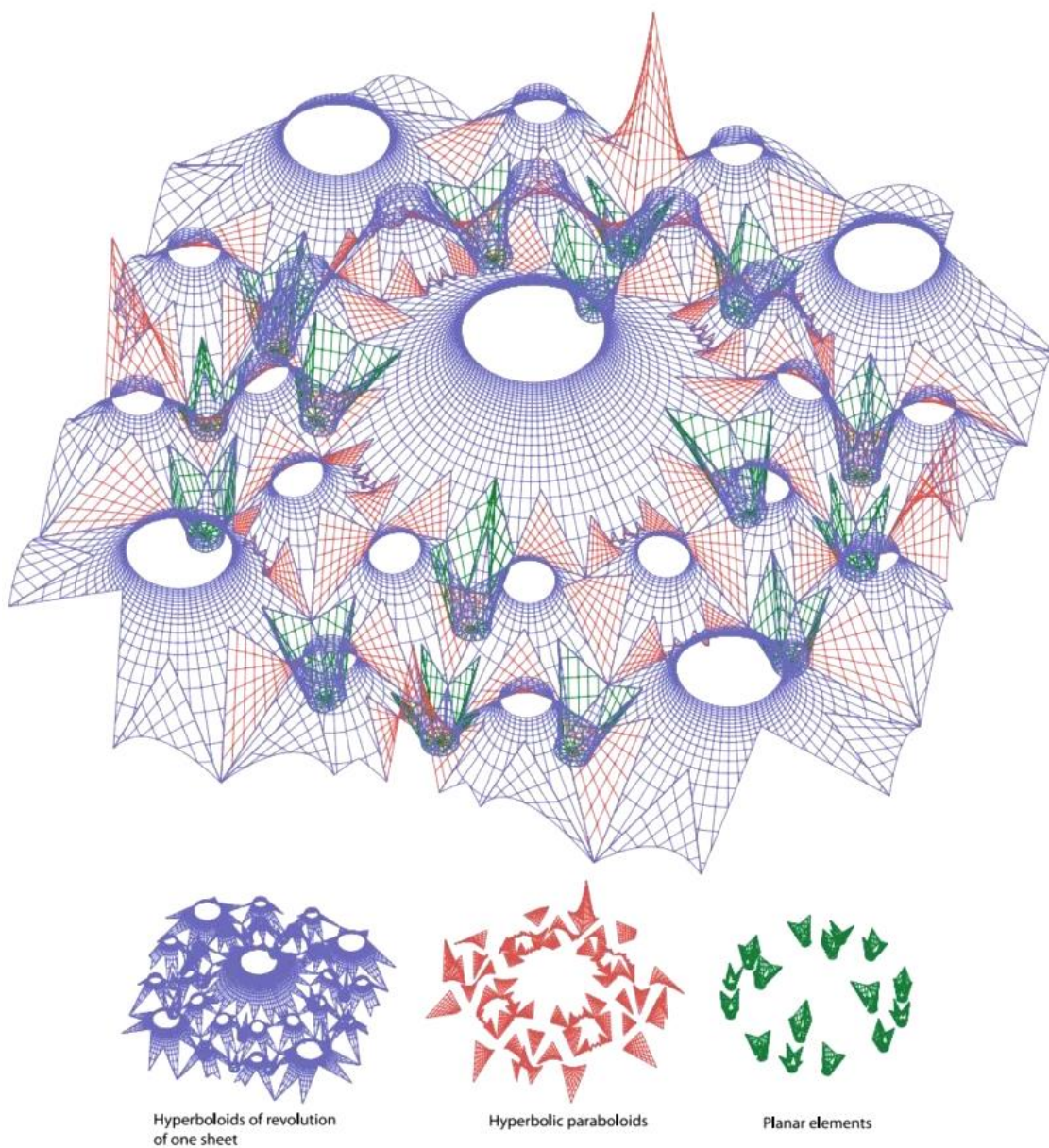


Fig. 75 - Para evitar a necessidade de abóbadas e permitir a receção e transmissão de luz natural todos os espaços entre o esqueleto estrutural da Sagrada Família foram reduzidos ao mínimo. Tal foi feito através de um conjunto de claraboias de tijoleira em hiperboloides de revolução conectados através de paraboloides hiperbólicos. Do livro de Legendre G. “MatheMatics of space” (2012).



Fig. 76 – Estrutura do Templo Expiatório da Sagrada Família.

A grande revolução industrial catalã desencadeou a necessidade de espaços de grande dimensão para armazéns, fábricas, estações ferroviárias, etc. Lluís Muncunill i Parellada e, mais tarde, Cèsar Martinell i Brunet foram dois dos impulsionadores da utilização de abóbadas de tijoleira para estes espaços.

A fábrica Vapor Aymerich, Amat y Jover (1908) de Lluís Muncunill, foi concebida numa época de desenvolvimento industrial intenso em Tarrasa, na Catalunha. O complexo consiste em dois espaços: uma grande nave de produção e um pátio envolvido pela área de receção, energia e escritórios.

O lugar mais impressionante do conjunto é a nave de produção. Esta é constituída por uma estrutura de abóbadas onduladas de tijoleira (com 8 metros de luz, 1 metro de flecha e apenas 7cm de espessura) assentes em pares de arcos catenários de diferentes dimensões e colunas de ferro fundido (300 no total). Este sistema articulado é travado por tirantes e vigas metálicas ortogonalmente dispostas que atenuam os esforços de tração nas duas direções.



Fig. 77 - A nave de produção não tem janelas. A sua iluminação é feita através das claraboias das abóbadas (orientadas a Norte).

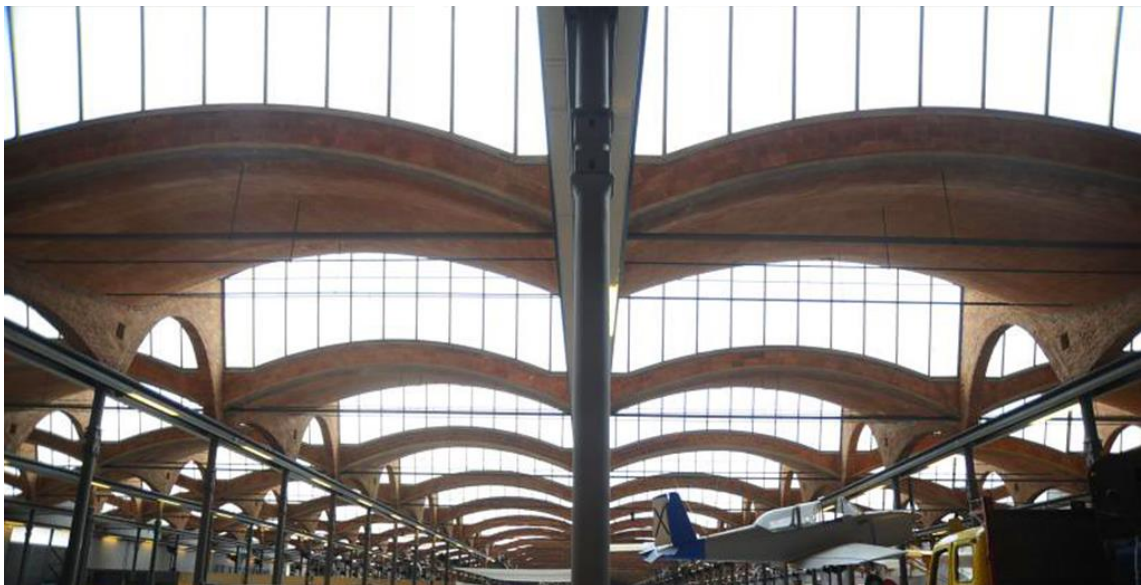
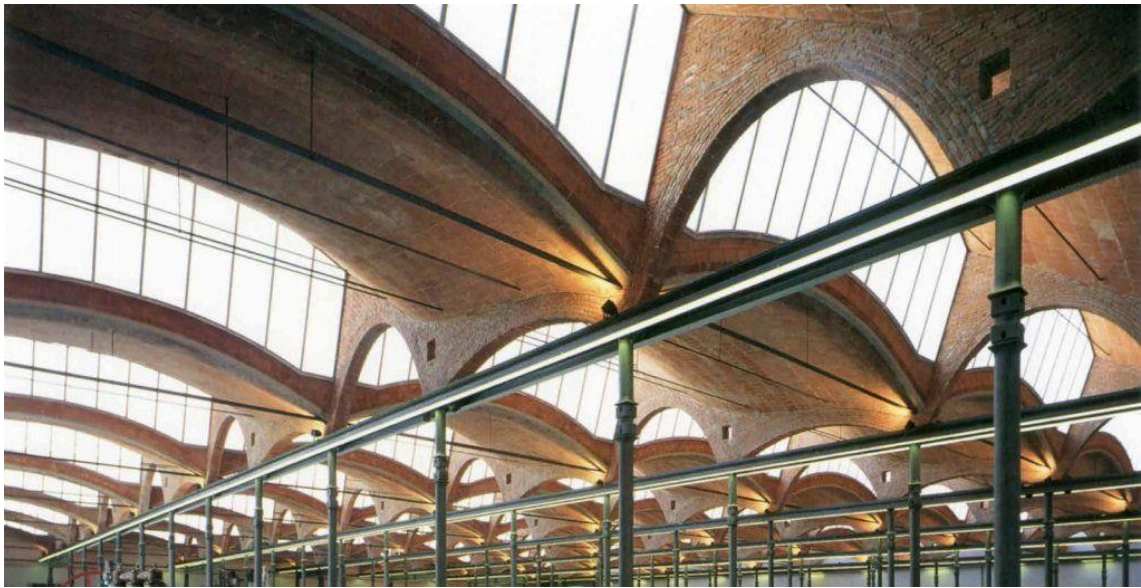


Fig. 78 – Perspectivas da fábrica Vapor Aymerich, Amat y Jover

Cèsar Martinell i Brunet (1888-1973) foi um arquiteto catalão que acompanhou a transição entre o modernismo catalão, o novecentismo e o estilo internacional. Contudo, a arquitetura modernista catalã (especialmente de Gaudí e de de Lluís Muncunill) foi a que mais influenciou nas suas obras fundamentais, as “catedrais do vinho”: as adegas de Pinell de Brai (1918), Nulles (1918), Rocafort de Queralt (1918), Falset (1919), Gandesa (1919) e de Sant Cugat del Vallès (1921).

O programa das adegas partilhava um critério essencial: a criação de um espaço com um pé direito elevado, um grande vão e o mínimo de apoios. Para tal, Martinell utilizou o arco catenário de tijolo como elemento estrutural principal. Tal como a Masia Freixa de Lluís Muncunill (1914) as enjuntas das catenárias não foram cobertas, mas divididas por outras catenárias, o que permitiu minimizar a carga da estrutura, o desperdício de material e, simultaneamente, criar uma iterativa similaridade da forma.

Repetidos em sucessivos planos, os arcos são suporte das coberturas que, nos casos da adega Gandesa, Falset e Sant Cugat del Vallès são constituídas por abóbadas de tijoleira (as coberturas das adegas de Pinell de Brai, Nulles e Rocafort de Queralt são de madeira).



Fig. 79 - A estrutura da Masia Freixa, de Lluís Muncunill (1914), é composta por arcos catenários com enjuntas fraccionadas. Estas suportam a cobertura sinuosa constituída por abóbadas de tijoleira revestidas de uma argamassa cimentícia com pequenos cristais embutidos.

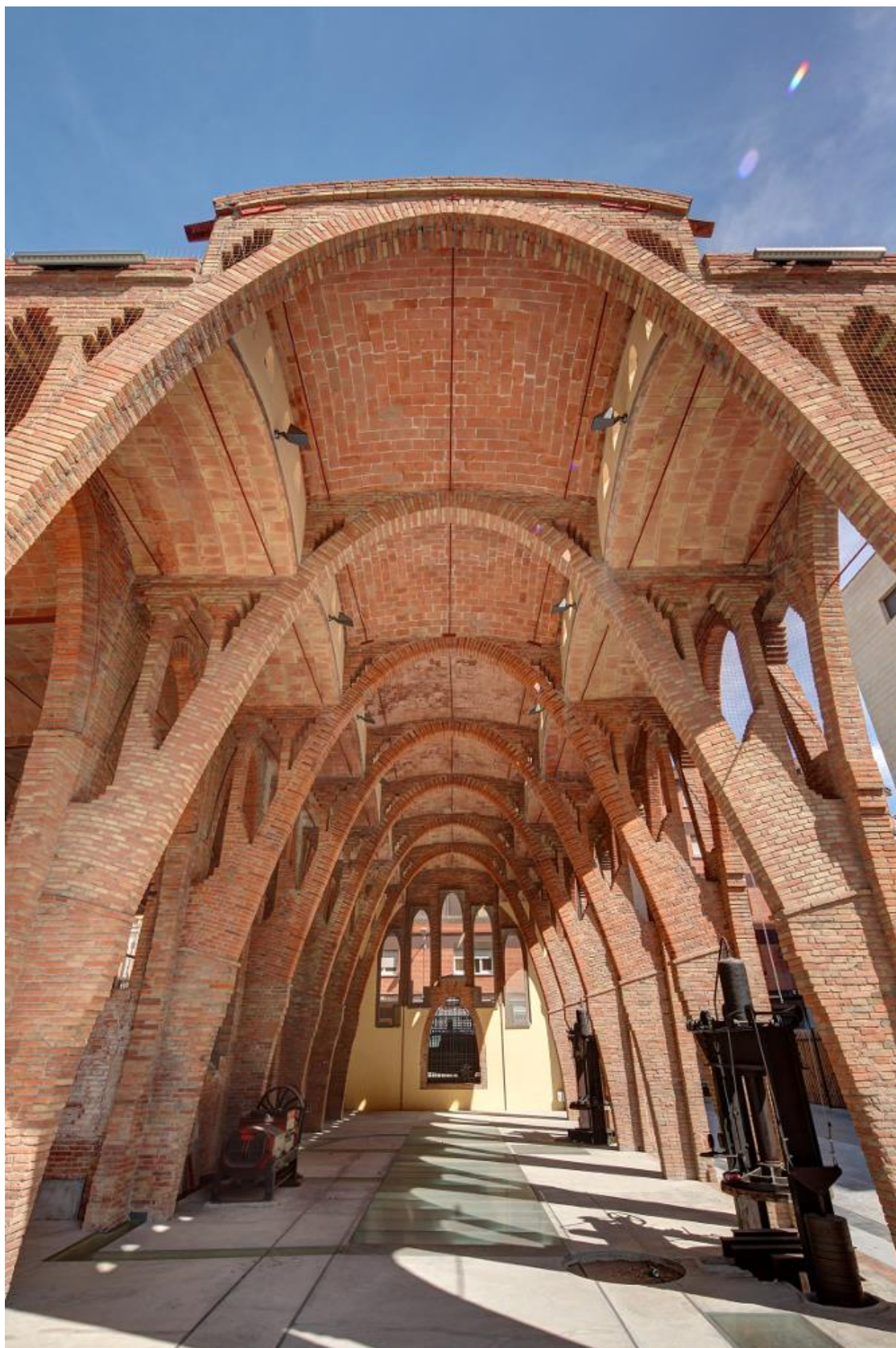


Fig. 80 - Adega de Sant Cugat del Vallès. Devido à sua magnificência, as adegas de César Martinel i Brunet são chamadas de “catedrais de vinho” (*“les catedrals del vi”*).

Como referido, a construção de abóbadas de tijoleira caiu em desuso no início do séc. XX.

Contudo, devido à escassez de ferro e cimento durante e após a 2ª Grande Guerra, a abóbada de tijoleira reapareceu na Europa. Em particular, na reconstrução de vastas regiões bombardeadas de Espanha (após a Guerra Civil de 1936–1939) e, numa menor escala, em França e Alemanha (mais especificamente na cidade de Munique). Apesar da reaparição, estas construções foram raras e a técnica continuou desconhecida para a maioria dos arquitetos.

Outro solavanco inesperado ocorreu imediatamente após a Revolução Cubana (1953-1959), com a criação de um dos complexos mais expressivos e dinâmicos de estruturas de tijoleira, as Escolas Nacionais de Arte (ENA) em Havana. Promovidas por Fidel Castro e Che Guevara em 1961, as escolas refletem o romantismo idealista dos primeiros anos da Revolução.

As escolas foram construídas no lugar de um campo de golf em Havana com o intuito de transformar um símbolo da hegemonia capitalista num instituto educacional de artes gratuito.

Para desenvolver o projeto em apenas dois meses, Castro contratou o arquiteto cubano Ricardo Porro (1925-20014), a quem se juntaram os arquitetos italianos Vittorio Garatti (1927) e Roberto Gottardi (1927.2017). Os arquitetos foram guiados por três princípios fundamentais: integrar o complexo à paisagem natural; utilizar tijolos produzidos na região (após o embargo dos EUA, era economicamente inviável importar aço e cimento); e, por consequência, utilizar a abóbada de tijoleira como o elemento arquitetónico dominante.

O projeto era composto por cinco escolas: dança moderna, artes plásticas, artes dramáticas, música e balé; e todas compartilhavam o mesmos material e estrutura. No entanto, cada uma era singular quanto à organização, dimensão e disposição dos espaços.

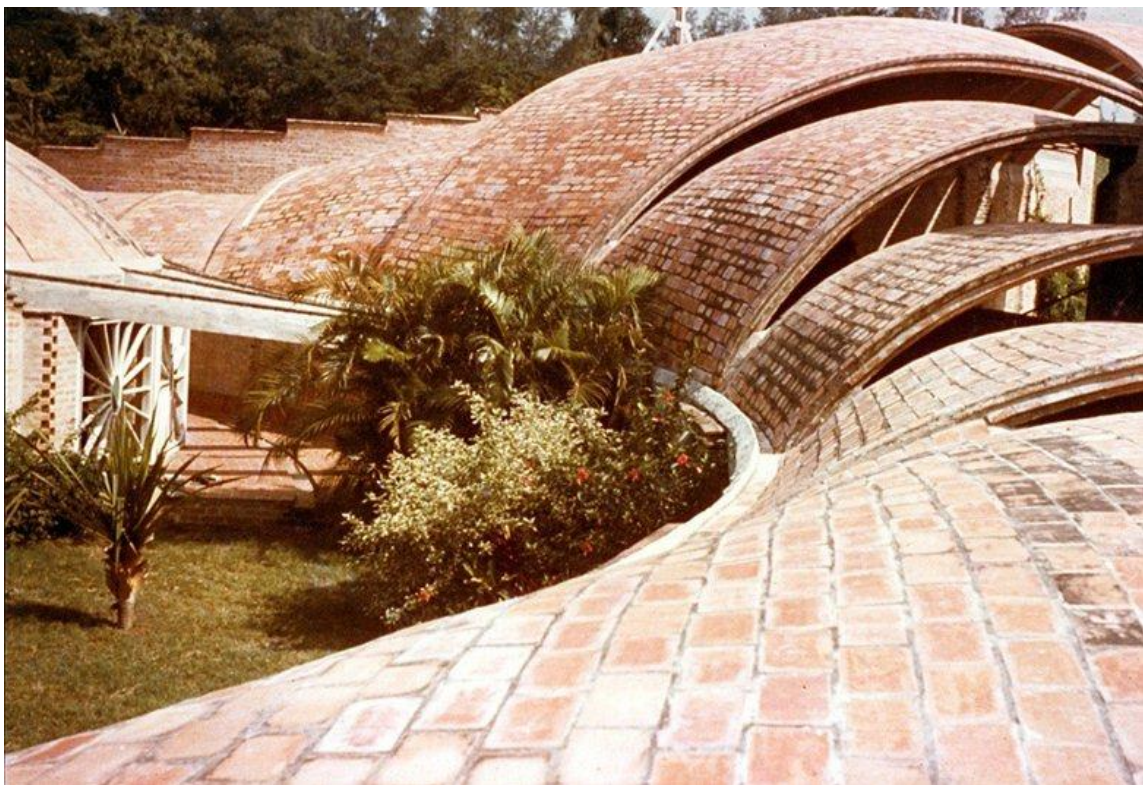


Fig. 81 – Entre as abóbadas das diversas escolas, as abóbadas de tijoleira da Escola de Ballet, de Vittorio Garatti, são as que tem secções mais esbeltas. A escola é composta por um conjunto de cúpulas entre as quais serpenteiam caminhos entrelaçados cobertos por distintas abóbadas de canhão.



Fig. 82 – Pavilhão principal da Escola Ballet.

A construção de abóbadas de tijoleira foi resgatada graças à descoberta acidental das experiências realizadas por um pedreiro chamado Gumersindo (cujo pai havia trabalhado com Gaudí).

Além de economicamente viáveis, as formas orgânicas das abóbadas de tijoleira eram consonantes com o otimismo que se vivia em Cuba. Apesar da sua origem mediterrânea, elas adaptaram-se à busca de uma identidade própria, livre e revolucionária.

Todavia, os primeiros anos após a Revolução Cubana foram marcados por uma grande instabilidade política e uma forte influência ideológica da União Soviética. Quanto à arquitetura, a visão soviética funcionalista, anónima e pragmática influiu sobre a crítica cubana e, em 1965, as escolas foram consideradas incompatíveis com os valores da revolução. Para o Ministério da Construção de Cuba a estética, a dimensão e o custo das escolas procediam de uma atitude elitista que estava contra as necessidades do povo.

Por esse motivo, a construção foi abruptamente interrompida e, das cinco, apenas a Escola de Dança Moderna, a Escola de Artes Plásticas e a Escola de Ballet foram finalizadas (na última, faltava apenas colocar as fenestraçãoes e o piso da sala principal).

Nas décadas seguintes, as escolas foram abandonadas, vandalizadas e progressivamente absorvidas pela vegetação. Porém, essa evolutiva degradação acabou por lhes conceder uma nova beleza.

No final do séc. XX e início do séc. XXI surgiram várias iniciativas de valoração das escolas e elas voltaram a ser aceites como património arquitetónico cubano.⁵³ Este manifesto apelou a atenção de Castro que, pouco tempo depois, acabou por anunciar a sua reconstrução.

“Era una obra abierta, abierta como lo era la Revolucion.”

Vittorio Garatti ⁵⁴

⁵³ Em 1999 Loomis J. escreve “Revolution of forms: Cuba's forgotten art schools”.

⁵⁴ “Era uma obra aberta, aberta como o era a Revolução.” Garatti V. no documentário “Unfinished Spaces” (2011) de Nahmias A. e Murray B.

Ao longo dos últimos 10 anos, assistimos à reinterpretação da abóbada de tijoleira. Em boa parte, este renascimento resulta das investigações históricas e construtivas que têm sido conduzidas e à criação de novos processos de procura da forma digitais, entre eles, a Análise de Impulsos de Rede.

A estabilidade das abóbadas de tijoleira depende da geometria da estrutura que, por estar sujeita às forças de compressão, deve ser antifunicular. Deste modo, as múltiplas possibilidades de estruturas comprimidas estão circunscritas por parâmetros e variações limitadas. Através do desenvolvimento da Análise de Impulsos de Rede a investigação da Block Research Group da ETH procura compreender os limites dessas variações.

Para validar a utilização deste método (descrito no capítulo 3.2) foi realizada em 2010 uma abóbada de tijoleira de dimensão aproximada de 7,5m por 5,5m cuja forma, aparentemente livre, é na realidade resultado de parâmetros estruturais restritos.⁵⁵

Este protótipo foi essencial para a utilização do processo em projetos posteriores, como o Centro Interpretativo de Mapungubwe na África do Sul (2011) e a Biblioteca Maya Somaiya na Índia (2018).



Fig. 83 – Abóbada de tijoleira de dimensão aproximada de 7,5m por 5,5m com forma aparentemente livre. BLOCK Research Group, ETH (2010).

⁵⁵ No artigo “Innovative Funicular Tile Vaulting: A prototype in Switzerland, The Structural Engineer” (2012) escrito pelos próprios Davis L., Rippmann M., Pawlofsky T. e Block P. são fornecidas mais informações sobre a abóbada.

O Centro Interpretativo de Mapungubwe está situado na confluência dos rios Shashe e Limpopo, que marcam a fronteira entre a África do Sul, Botsuana e Zimbábue. Classificado como Patrimônio da Humanidade, o Parque Nacional de Mapungubwe foi o local do reino de mesmo nome (entre o século XI a XIII) e, é da vontade do registo e exposição da sua história que surgiu a proposta da criação de um centro interpretativo.

O Centro Interpretativo de Mapungubwe foi projetado em 2011 pelo arquiteto Peter Rich em parceria com Michael Ramage e John Ochsendorf. O projeto partiu de várias questões fundamentais: como celebrar a antiga civilização de Mapungubwe? Como fundir a arquitectura com o cenário natural da região? Como reduzir o seu impacto ambiental? Como envolver as comunidades no processo de construção?

E como utilizar de forma eficiente os materiais locais? Ao contrário do espectável, todos estes problemas subjetivos, sociais, paisagísticos e construtivos tiveram uma resposta estrutural.

A premissa de construir através dos materiais da paisagem envolvente estabeleceu um fio condutor. Na localidade existe essencialmente terra e pedra, materiais que resistem à compressão. Em termos estruturais, a maneira mais adequada de construir com estes é através de formas antifuniculares e um dos sistemas construtivos mais eficientes é a abóbada de tijoleira. Deste modo, o projeto surgiu de uma subtil continuidade entre o território, o material, a forma e o seu sistema construtivo.

Como referido, o processo de procura da forma foi a Análise de Impulsos de Rede. Contudo, também foram realizados estudos gráficos através de polígonos funiculares que admitiram cargas assimétricas e permitindo aferir, com uma boa margem de segurança, a espessura necessária para manter a estabilidade das cascas.

Outra novidade sobre estas abóbadas foi o seu material. As abóbadas são formadas por tijoleiras de terra estabilizada comprimida (com 5% de cimento) o que permitiu uma construção com baixo impacto ambiental e custo material. Embora esta tijoleira seja mais frágil, ela tem uma resistência à compressão capaz de suportar as cargas da estrutura.⁵⁶

⁵⁶ Para mais informações: “Design and Construction of the Mapungubwe National Park Interpretive Centre, South Africa” (2010) de Ramage, M., Ochsendorf J., Rich P., Bellamy J. e Block P.



Fig. 84 - A construção do Centro Interpretativo de Mapungubwe gerou um envolvimento social. O método construtivo requer mão-de-obra intensiva e, para tal, foram empregados homens e mulheres das comunidades que antes da construção receberam uma formação sobre abóbadas de tijoleira. Projetos desta natureza podem ter um impacto que os transcendem: gerar novas tradições construtivas, revitalizar a economia e fomentar uma nova ligação entre as pessoas e a arquitetura.



Fig. 85 – A tijoleira das abóbadas, a pedra do revestimento e a madeira das pérgulas são originários da região. Esta ligação entre a forma, cor e materiais da paisagem cria uma impressão de pertença e intemporalidade entre a arquitetura e a natureza.

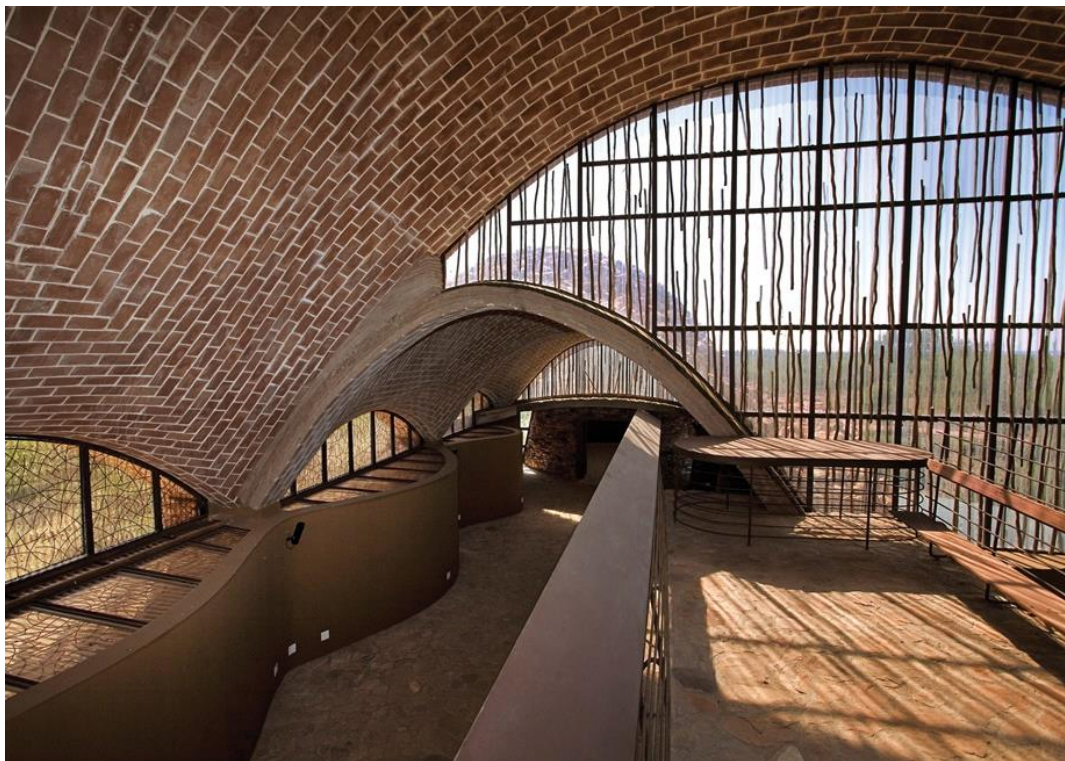
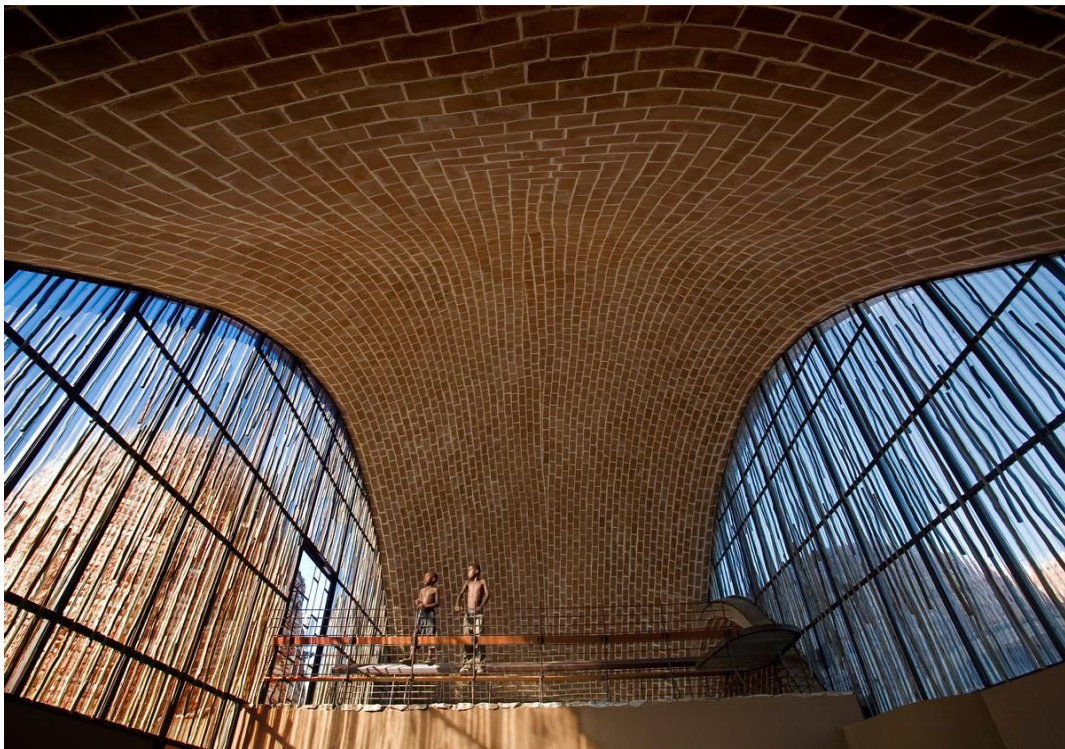


Fig. 86 - A forma das abóbadas e a iluminação desenhada pelas ripas de madeira dão uma atmosfera serena e solene ao interior do espaço.

Can architecture actually become a part of the memories that you associate with your development, (...) and could we actually create a building that would imbed itself into the imagination of the children that go through the school?

Sameep Padora ⁵⁷

O objetivo fundamental do projeto da Biblioteca Maya Somaiya, na Escola de Sharda na Índia (2018) foi criar numa única casca, um espaço interior de livraria e uma cobertura exterior acessível que surgisse como uma extensão suave do piso exterior. Além desta condição, o projeto foi guiado por outra questão essencial: como desenhar e construir aproveitando as capacidades arquitetônicas do tijolo? Estas premissas levaram os arquitetos Sameep Padora & Associates ao desenvolvimento de uma abóbada de tijoleira de flecha rasa através de Análise de Impulsos de Rede.

Devido à complexidade formal da abóbada, a construção exigiu a utilização de cimbres. Para tal, foram dispostos numa grelha ortogonal um conjunto de 6500 postes de distintas dimensões. A grelha concedeu a coordenada X e Y e os postes a coordenada Z dos pontos que permitiram enfim formar o cimbres constituído por uma malha ortogonal de varões de aço. Este processo permite a futura reutilização dos varões e a poupança da madeira necessária na criação de um cimbres convencional.

Para conferir reforço à estrutura foram incorporadas geogrelhas entre as fiadas de tijoleira. As geogrelhas são malhas retangulares de tecidos sintéticos com uma elevada resistência à tração. Estas são vazadas de modo a permitir uma maior aderência entre o cimento e a malha. Deste modo, as geogrelhas concederam um reforço capaz de resistir as vibrações dinâmicas geradas pelas cargas verticais variáveis exercidas durante o trânsito das pessoas na cobertura. No total, a casca é composta por três camadas de tijoleira que, com a argamassa e geogrelha, formam uma secção total de 14cm e um vão que cobre 8 a 45 metros de comprimento. ⁵⁸

⁵⁷ “Será que a arquitetura pode tornar-se parte das memórias que associamos ao nosso desenvolvimento, (...) e será que poderíamos realmente criar um edifício que se embutisse na imaginação das crianças que frequentam a escola?” Padora S. no curto documentário “Maya Somaiya Library | Sameep Padora and Associates | #ThinkTurf” (2019).

⁵⁸ “Maya Somaiya Library, Sharda School / Sameep Padora & Associates” ArchDaily: <<https://www.archdaily.com/903713/maya-somaiya-library-sharda-school-sameep-padora-and-associates/>

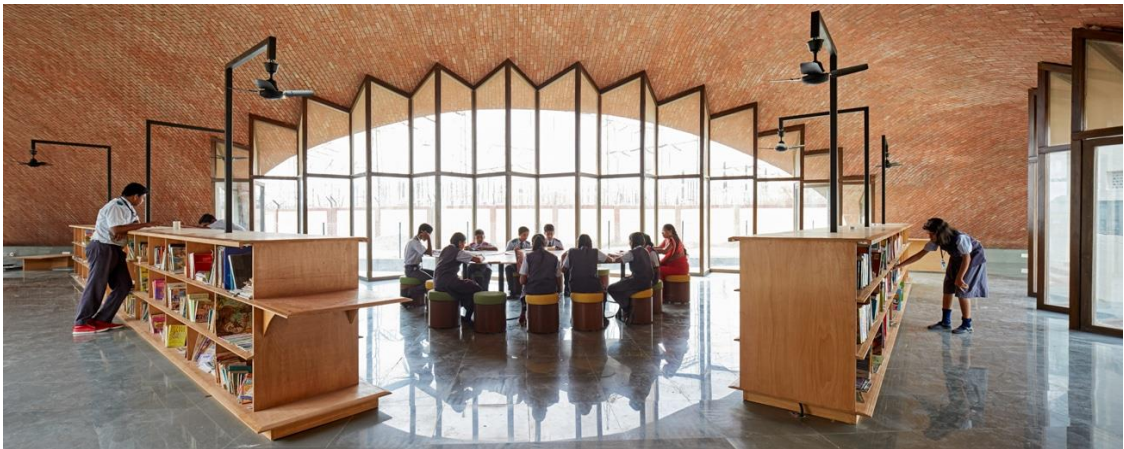


Fig. 87 – Vistas interiores e exteriores da Biblioteca Maya Somaiya.

Ao longo do tempo consagraram-se abóbadas de tijoleira em diferentes regiões do globo. Esta extensão procedeu-se de inúmeras evoluções a nível material (através da utilização do cimento e do aço no séc. XIX) e formal (através da exploração de processos físicos e digitais de procura da forma).

Contudo, a partir do início do século XX, o sistema caiu em desuso. Em parte, devido ao surgimento das cascas de betão armado, do aumento do custo de mão-de-obra, do advento de uma arquitetura composta por superfícies planas e modulares e da renúncia, por vezes fundamentalista, da arquitetura e métodos construtivos passados. Não obstante, existem várias características que justificam a sua utilização:

- As abóbadas são essencialmente compostas por tijoleiras que, além de serem facilmente produzidas, são compostas por terra, material que se encontra disponível na grande maioria das regiões do globo;

- A tijoleira cozida e as tijoleiras de terra estabilizada comprimida permitem uma construção com baixo impacto ambiental e podem ser recicladas;

- Existe uma vasta série de acabamentos que podem ser realizados nas ou sobre as tijoleiras;

- As abóbadas de tijoleira antifuniculares são estruturas cujas formas são naturalmente integradas às forças e materiais que as condicionam.

“You say to brick, ‘What do you want, brick?’ Brick says to you, ‘I like an arch.’ if you say to brick, ‘arches are expensive and I can use a concrete lintel over an opening.

What do you think of that, brick?’ Brick says: “I like an arch.”

Louis Khan⁵⁹

⁵⁹ “Se perguntares a um tijolo, ‘O que é que queres tijolo?’ O tijolo te dirá, ‘Eu gosto de um arco’. No caso de insistires, ‘Os arcos são caros e eu posso usar um lintel de betão. O que pensas sobre isso, tijolo?’ O tijolo responderá: ‘Eu gosto de um arco.’” Citação atribuída a Louis Khan do livro de Lesser W., “You Say to Brick: The Life of Louis Kahn” (2010).

4.2 Cascas de betão

Desde a invenção do arco e da sua movimentação no espaço que as estruturas em casca têm sido utilizadas. Todavia, a construção de cascas esbeltas em betão começou apenas nas primeiras décadas do séc. XX.

O ovo é um exemplo natural que demonstra as características fundamentais de qualquer casca: além de possuir uma espessura mínima em relação ao espaço que contém, ele possui uma capacidade de suportar elevadas cargas à compressão. Assim, o princípio físico que rege a materialidade, a técnica construtiva e a geometria das cascas de betão armado e pré-esforçado é que a estrutura contenha essencialmente esforços internos de compressão.

João Pedro Fialho assinala 5 fatores essenciais que permitiram a evolução das cascas de betão: ⁶⁰

- As inovações na qualidade do betão e do aço: menores tempos de presa e progressivo aumento de resistência do betão e aumento da capacidade de tensão do aço (passou da escassa dezena de Kg/mm² para tensões da ordem dos 100 Kg/mm²);

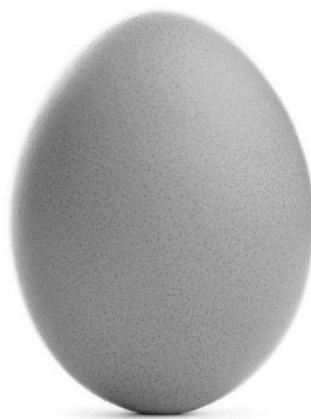


Fig. 88 - Apesar de ter uma espessura ínfima um ovo de codorniz pode aguentar uma carga à compressão de 0,9 kg; de galinha uma carga de 32,9 kg; e de avestruz uma carga de 225 kg. Contudo, um pequeno esforço transversal parte facilmente qualquer uma das cascas (ver ensaios da ZwickRoell).

⁶⁰ Fialho J. em “Coberturas de Grande Vão – Aspectos da sua Evolução Recente e Metodologias para a Concepção Arquitectónica das Coberturas Traccionadas” (1991);

- O desenvolvimento das técnicas de construção: a evolução de métodos de execução de cofragens e escoramentos;

- O progresso do conhecimento e cálculo do fluxo de forças numa estrutura: com o advento do cálculo analítico e gráfico, e com o desenvolvimento morfológico através dos processos de procura da forma;

- A evolução das condições económicas e sociais no início do séc. XX: a mão-de-obra barata, a crescente globalização, o acesso a novos materiais e a standardização;

- E a transformação dos conceitos estéticos. A partir do final do séc., XIX foi ressurgindo o interesse estético por uma arquitectura que evidenciasse a sua estrutura:

“En effet, toute architecture procede de la structure, et la première condition qu’elle doit remplir s’est de mettre sa forme apparente d’accord avec cette structure”

Violet-le-Duc (1863).⁶¹

Para o desenvolvimento das cascas foi essencial a invenção de uma nova técnica construtiva – o betão armado pré-esforçado. O betão pré-esforçado é um betão armado cujos elementos que resistem à tração (usualmente cabos metálicos) são pré-tracionados (antes da consolidação do betão) ou pós-tracionados (após a consolidação do betão). Estes sistemas garantem uma maior resistência da estrutura a esforços de tração do que o betão simplesmente armado (sendo o betão armado pré-tracionado o mais eficiente para a criação de cascas).

O desenvolvimento de cascas em betão armado e pré-esforçado iniciou-se nos anos 20. Durante esta fase tornou-se evidente as potencialidades utilitárias da sinergia material entre o aço e o betão e a utilização de geometrias eficientes (que não são procedentes de arcos de volta perfeita (esfera, cilindro, etc.), mas de geometrias que contêm essencialmente esforços axiais).

⁶¹ “De fato, toda arquitetura prossegue da sua estrutura, e a primeira condição que ela deve atender é de colocar a sua forma aparente de acordo com essa estrutura”. Violet-le-Duc em “Entretiens sur l’architecture” (1863).

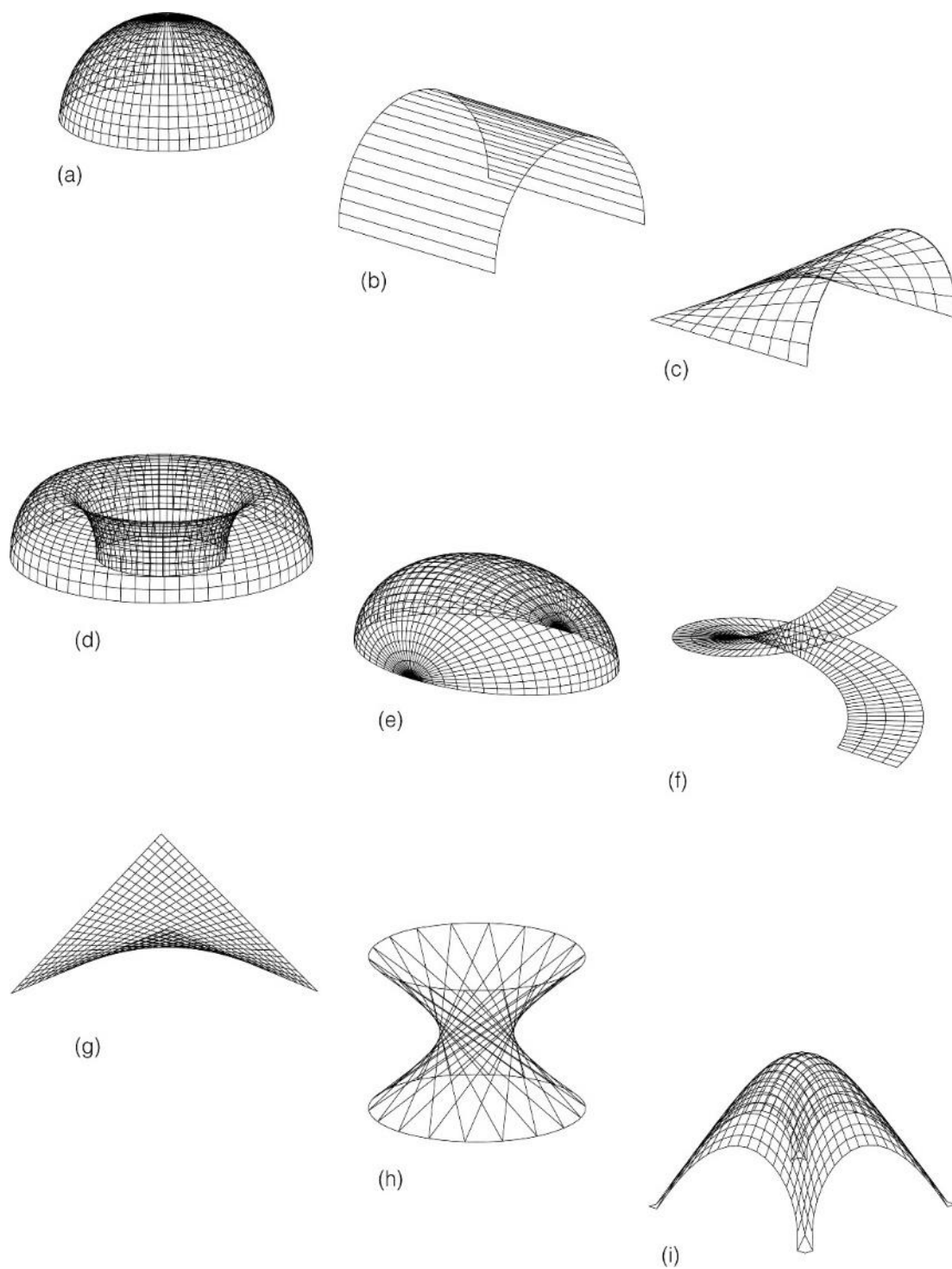


Fig. 89 – Algumas das geometrias mais utilizadas para a geração de cascas (do autor).

Face à escassez de aço no período que envolve a 2ª Guerra Mundial, tornou-se essencial a construção de estruturas que necessitassem de menores quantidades do material, ou seja, que resistissem quase exclusivamente à compressão. Este foi um dos motivos que propulsionou o desenvolvimento de cascas através de geometrias e técnicas que permitissem a fluência das forças pelo seu interior.

De forma simplificada, as famílias geométricas mais utilizadas para a geração de cascas nos anos 40, 50 e 60 (ver Fig. 89) foram: superfícies de revolução (a); superfícies de translação (b); conoides (c) toróides (d); elipsoides (e); helicoides (f); paraboloides hiperbólicos (g); hiperboloides de revolução (h); e superfícies anti-funiculares (i).

Eugène Freyssinet (1879-1962) foi um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento do betão pré-esforçado. Além da descoberta do método construtivo, Freyssinet expôs a lenta contração do betão após o seu endurecimento, melhorou o sistema de vibração e tornou-o uma realidade industrial. Entre os vários métodos inventados ao longo do séc. XX, o “pré-esforço” foi porventura o que teve mais impacto na conceção da arquitetura moderna. Este método foi similarmente fundamental na criação de cascas de betão.⁶²

Além dos avanços técnicos e materiais, Freyssinet adotou geometrias eficientes às suas estruturas. O Hangar para dirigíveis de Orly (1921) e a Halles centrales du Boulingrin em Reims (1927-1929) são dois dos exemplos mais importantes do início da exploração de cascas de betão criadas a partir de geometrias antifuniculares.

O Hangar para dirigíveis de Orly foi uma das primeiras cascas de diretriz parabólica a ser edificada. Com 90m de largura, 300m de comprimento e 62,5m de altura, esta abóbada tem o formato duma parábola (muito próxima da catenária), uma das soluções geométricas mais eficientes de construir um arco.

A inércia necessária para impedir o enfunamento da casca foi adquirida através da curvatura plissada da sua superfície.

⁶² O pré-esforço foi patenteado por Freyssinet E. em “Procédé de fabrication de pièces en béton armé” (1928).

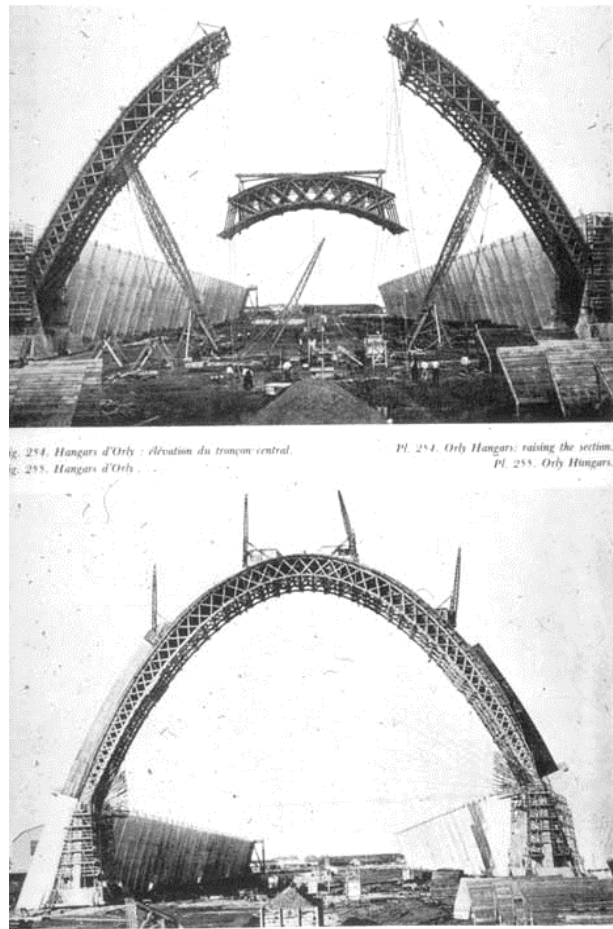


Fig. 90 – Sequência de colocação do cimbre.

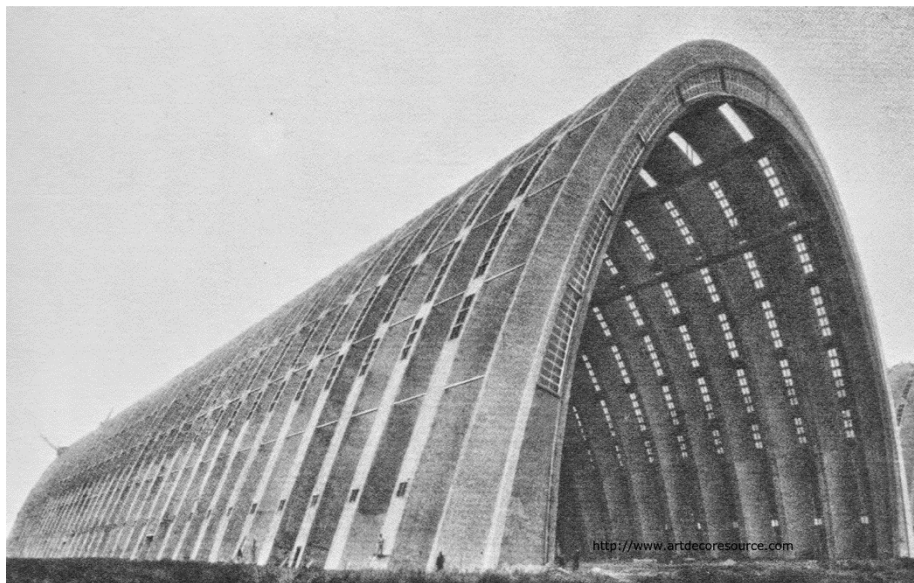


Fig. 91 – A Estrutura definitiva do Hangar para dirigíveis de Orly (1921) foi feita através da translação do cimbre ao longo de um eixo.

Freyssinet foi um dos precursores de um crescente interesse por possibilidades plásticas mais complexas e eficientes, interesse que se tornou fulcral para o desenvolvimento exponencial entre os anos 30 e 60.

Este avanço foi progressivo e as superfícies de revolução e de translação foram as primeiras a serem desenvolvidas. A escolha destas formas deveu-se tanto pela relativa simplicidade de concepção e análise da forma como pela economia material e temporal de superfícies compostas por secções idênticas. Pela sua forma, as superfícies de revolução foram usadas em mercados, auditórios e pavilhões desportivos enquanto que as superfícies de translação foram utilizadas em hangares e garagens.

Após o primeiro período de exploração, surgem novas soluções marcadas por uma vasta diversidade formal assente em superfícies de dupla curvatura positiva e negativa (por estas dispensarem o uso de elementos que impeçam o desenrolar das superfícies).⁶³



Fig. 92 - O Mercado coberto de Leipzig (1928) de Ritter H. e Dischinger F. possui duas cúpulas de planta octogonal que têm 75 metros de vão, 29 metros de altura e uma espessura de apenas 9cm. Suportadas por oito colunas inclinadas, as cúpulas são compostas por oito cascas de dupla curvatura, o que possibilitou uma relação entre peso e vão sem precedentes.

⁶³ Na geometria diferencial, a curvatura de Gauss de uma superfície é o produto das principais curvaturas. Quando a superfície tem uma curvatura de Gauss nula constante, ela é uma superfície desenrolável e a geometria é euclidiana. Ao contrário desta, as superfícies com curvatura positiva (geometria esférica) e negativa (geometria hiperbólica) constante, tem uma dupla curvatura que impede o desenrolar da superfície.



Fig. 93 – Mercado de Algeciras (1935) de Arcas M. e Torroja E. De planta octogonal, a cúpula apoia-se sobre oito colunas periféricas. Esta tem um vão de 48 metros, apenas 9cm de espessura e é perfurada por uma claraboia com 10 metros de diâmetro. Para distribuir o peso para os pilares, a cúpula possui abóbadas periféricas em consola que possibilitam a entrada de luz.



Fig. 94 - A parte principal do complexo industrial da Fábrica de Borracha Brynmawr 1951) de Powers M. e analisado pela Ove Arup & Partners era um espaço coberto por nove cascas de betão armado que possuíam diversas claraboias circulares. Cada uma das cúpulas tinha 26 m de comprimento, 19 m de largura e menos de 9cm de espessura. As colunas de suporte conectavam as cascas em V, garantindo que os seus esforços fossem conduzidos axialmente pela estrutura.



Fig. 95 – Em cada uma das naves do hangar de Marignane (1952) de Auguste Perret e Nicolas Esquillan a cobertura é constituída por abóbadas parabólicas de 101,5 metros de vão, por 60 metros de comprimento e apenas 18cm de espessura. Para impedir o desenrolar das superfícies elas foram travadas com diafragmas rigidificadores com 10 metros de espaçamento entre si.



Fig. 96 - Garagem de Stockwell, Londres (1953) de Adie, Button & Partners, Thomas Bilbow e análise estrutural de Alfred Edward Beer. A cobertura da garagem tem 120 metros de comprimento e é composta por cascas de curvatura positiva suportadas por nervuras arqueadas com flecha rasa. Interrompida por claraboias transversais, cada casca estende-se por 59 metros e tem uma largura de 13 metros de comprimento.

Para além destas explorações geométricas, foram surgindo técnicas construtivas especiais associadas a tipos de geometria específicos. É o caso das geometrias plissadas, pneumáticas, regradas e anti-funiculares.

Nas décadas de 1950/60, surge um novo tipo de estruturas plissadas associadas a superfícies curvas: as cascas nervuradas de Pier Luigi Nervi (1891-1979).

Para evitar o enfunamento, as cascas de Nervi são assentes em nervuras radiais romboidais executadas através de peças de ferro-cimento pré-fabricadas em série. Dispostas em curvas loxodrómicas, estas peças impedem possíveis deformações da casca que suportam, aumentando a sua rigidez estrutural. Simultaneamente, as nervuras de secção variável proporcionam uma plasticidade estética expressiva no intradorso das cúpulas semelhante às disposições arborescentes de limbos folheais.

Alguns dos exemplos mais emblemáticos de cascas plissadas de Nervi são o Palacete de Desportos de Roma (1957) em superfície de revolução; o salão de festas das termas de Chianciano, (1952) em elipsoide; o restaurante do Casino Kursaal de Ostia em toróide; e o Palácio de Exposições de Turim (1949) em superfícies de translação.

Estas nervuras apresentam uma variedade plástica que ameniza as diferentes tensões existentes na casca. Contudo, a primeira estrutura plissada cujas nervuras são o resultado absoluto das pressões inerentes não foi uma casca, mas um pórtico, a Gatti Wool Mill (1951). Por sugestão de Aldo Arcangeli, os padrões das vigas foram determinados pelas linhas isostáticas do campo de forças inerentes na laje (Fig.101).⁶⁴

Embora a análise de linha de pressão tenha o potencial de oferecer uma abordagem de otimização direta a sua aplicação tem sido geralmente limitada devido à difícil geração e interpretação da forma. Contudo, através da exploração de diferentes algoritmos computacionais tem-se verificado uma maior simplificação dos processos que permite não só a visualização direta das linhas isostáticas como a formulação de uma solução de otimização topológica.

⁶⁴ As linhas isostáticas são as curvas que mostram as trajetórias de forças internas que permitem distinguir as áreas ideais para adicionar material. Estas linha informam a direção de otimização topológica da respetiva estrutura.



Fig. 97 – Construção do Palacete de Desportos de Roma.

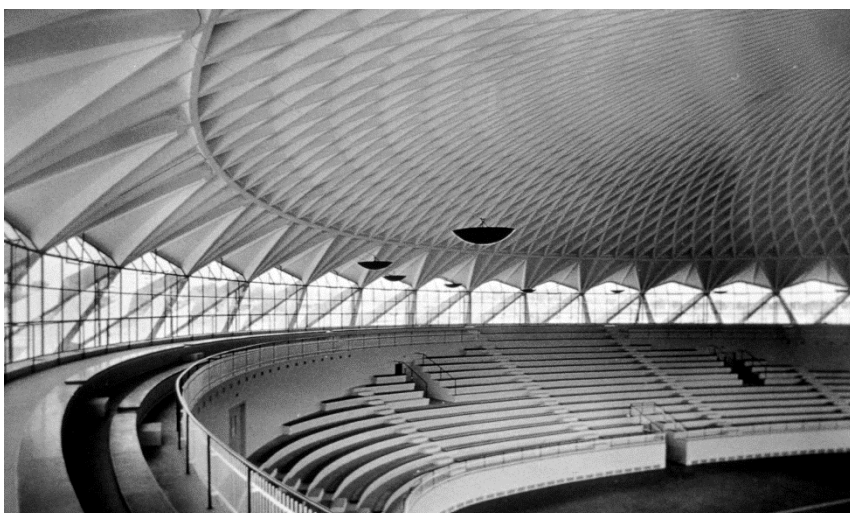


Fig. 98 – Vista interna do Palacete de Desportos de Roma.



Fig. 99 - Salão de festas das termas de Chianciano em planta elíptica.

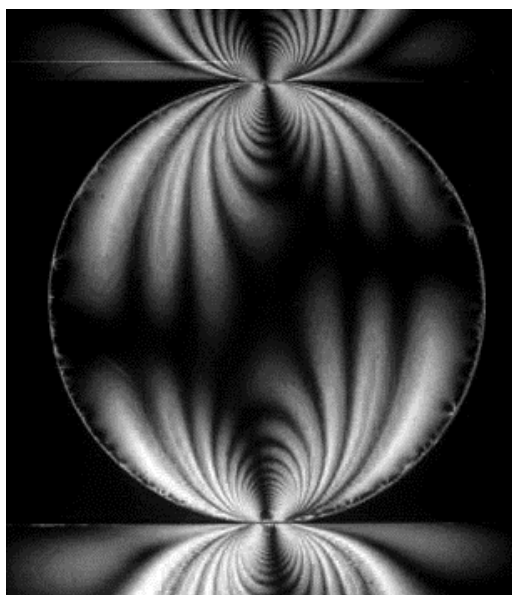


Fig. 100 – Fotografia das linhas isostáticas criadas pela carga de compressão a uma chapa de acrílico circular (fotoelasticidade).



Fig. 101 - Embora as linhas de pressão possam ser descobertas através de processos físicos (fotoelasticidade e interferometria holográfica), Arcangeli calculou a disposição das nervuras através de cálculos matemáticos (teoria das placas e lâminas). Todavia, atualmente é possível encontrar as linhas isostáticas do campo de forças através do Método dos Elementos Finitos e a sua sucessiva solução estrutural através de Otimização Topológica.

Das geometrias anticlásticas, as superfícies regradas foram as mais utilizadas. Este tipo de cascas (paraboloides hiperbólicos, hiperboloides de revolução, conoides, etc.) possuem geratrizes retas e, por esse motivo, são geometrias que podem ser construídas com cofragens rígidas planas (o que permite reduzir o tempo e o custo de construção).

A construção de cascas de betão com superfícies regradas foi inicializada nos anos 30 por Giorgio Baroni (1907-1968). Porém, a sua evolução mais significativa deu-se com o arquiteto Félix Candela (1910-1997) durante as décadas de 1950/60. Félix Candela concebeu obras de arte estrutural cuja elegância e a beleza são fundadas em critérios de estabilidade, economia material e coerência construtiva.

A maioria dos exemplos arquitetónicos das superfícies regradas são compostos por perímetros retos (Fig. 103). Porém, Candela compôs formas regradas com perímetros curvilíneos que resultaram em estruturas com uma complexidade e dinamismo impressionante.



Fig. 102 – A Capela Lomas de Cuernavaca (1958) demonstra a compreensão que Candela F. adquiriu sobre as possibilidades formais, estruturais e construtivas dos paraboloides hiperbólicos. A casca autoportante possui uma dupla curvatura negativa dramática com uma altura de 21m, luz de 31m, e, em certas partes, uma espessura de apenas 4cm. Esta estrutura estendeu os limites do que se julgava possível realizar.

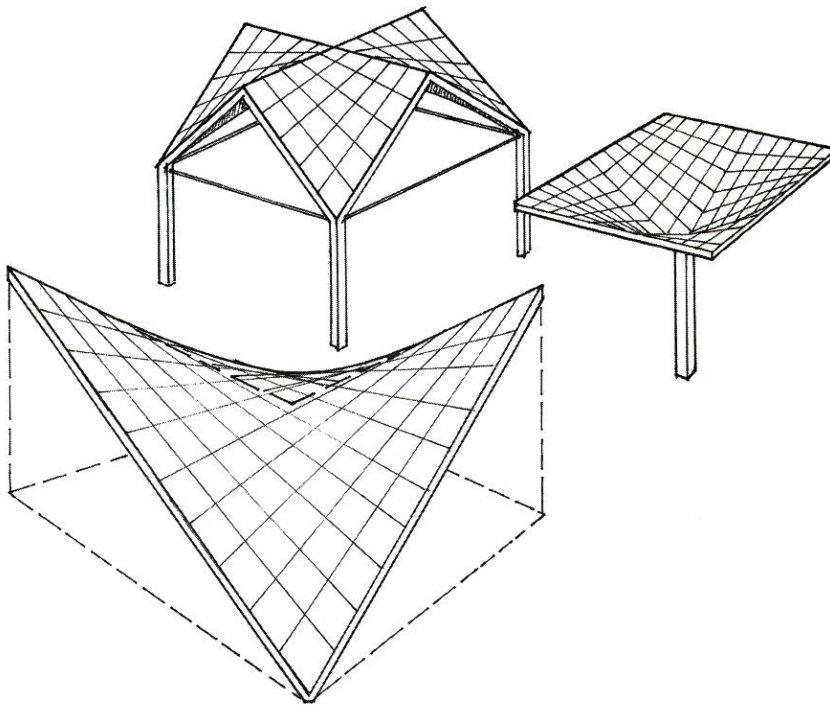


Fig. 103 – O parabolóide hiperbólico é uma superfície de dupla-curvatura gerada por segmentos de reta. Acima são demonstradas diferentes possibilidades geradas através da combinação de vários parabolóides hiperbólicos de perímetro reto. (Allen, E. e Zalewski, W. (2008)).

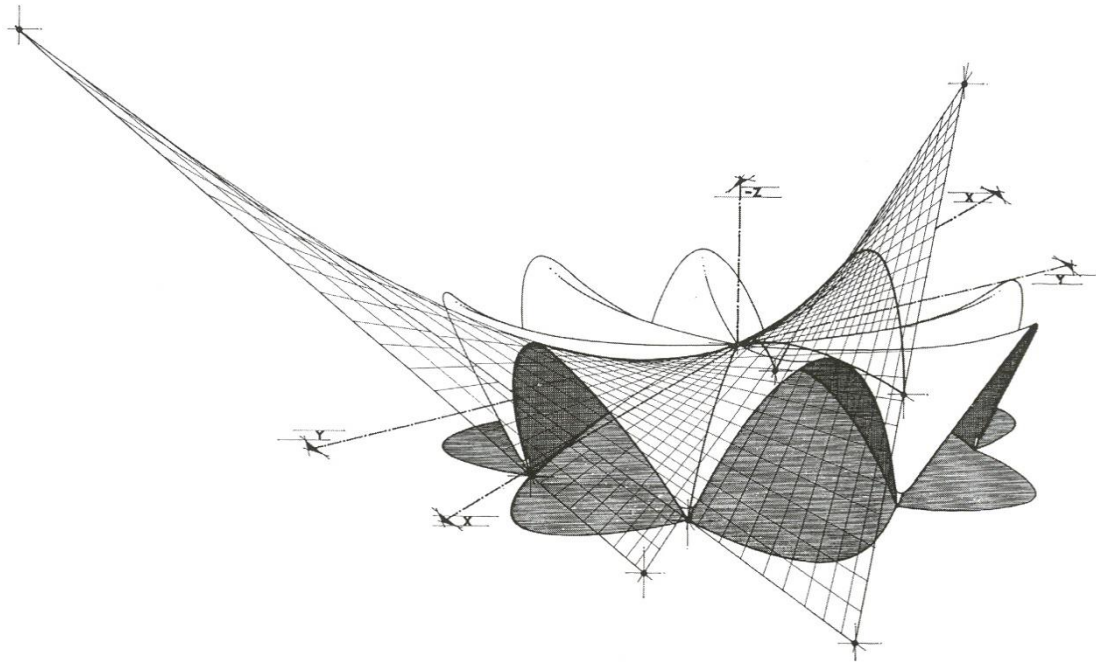


Fig. 104 - A cobertura do restaurante “Los Manantiales”, em Xochimilco, de Ordoñez A. e Candela F. (1958) é uma casca composta por quatro parabolóides hiperbólicos seccionados e radialmente distribuídos que se intersectam entre si.

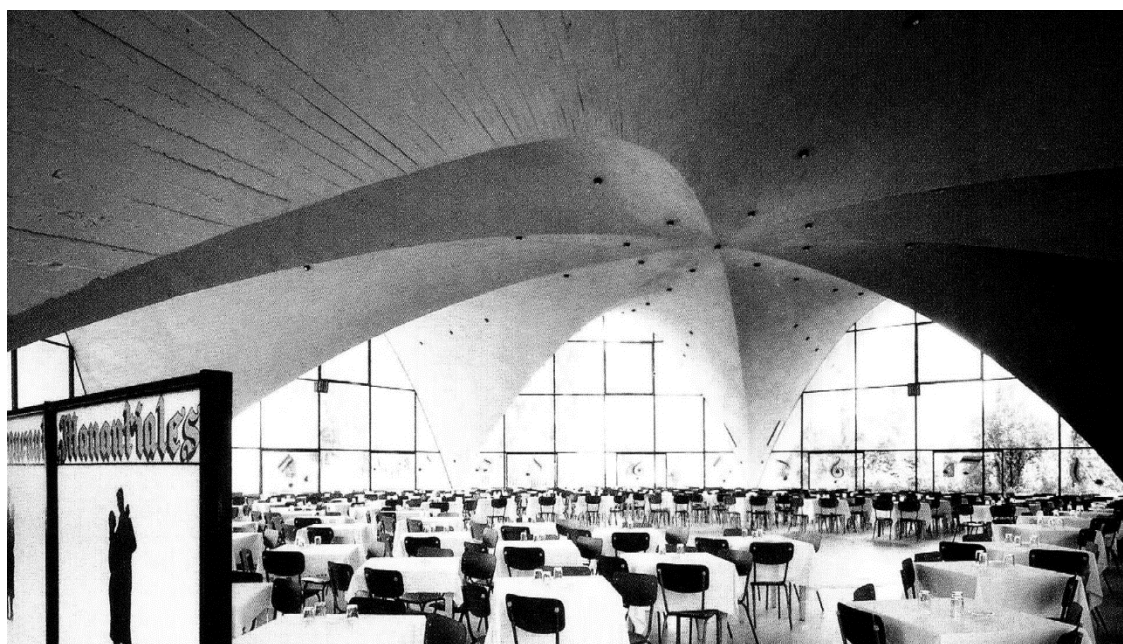
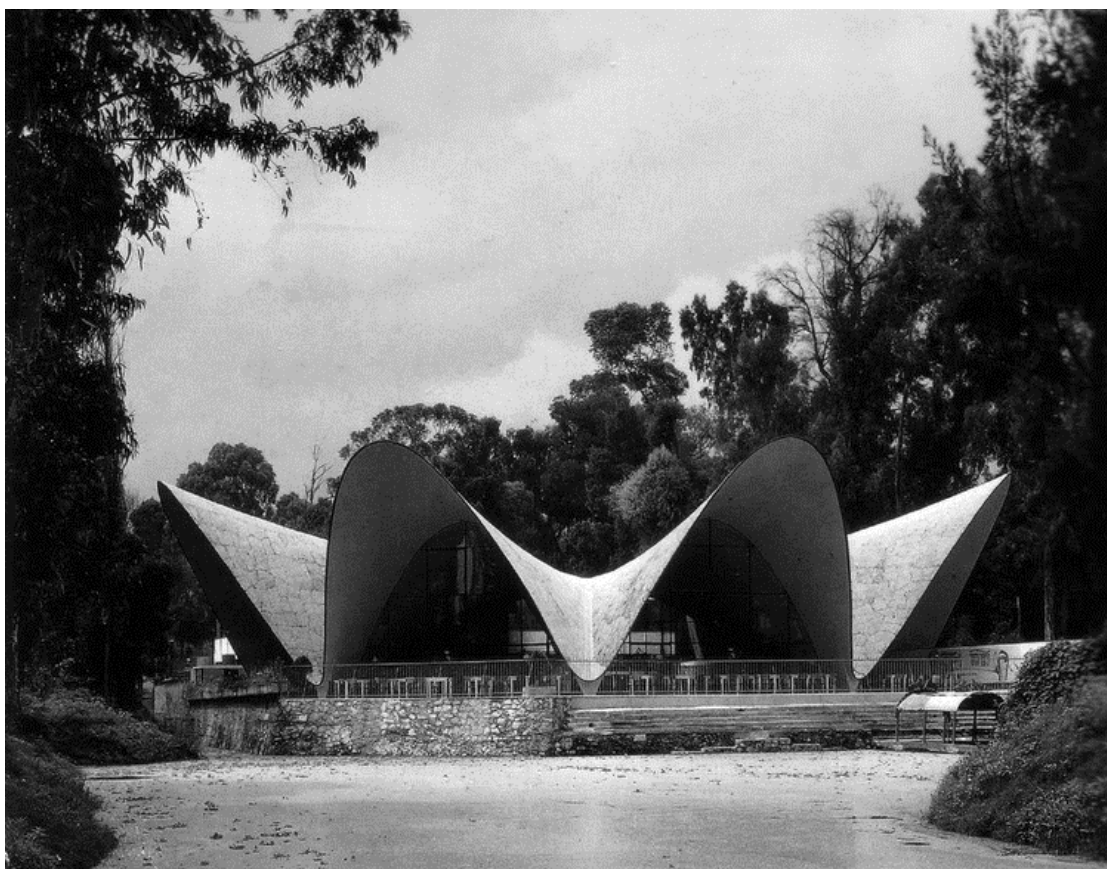


Fig. 105 – Vista exterior e interior do restaurante “Los Manantiales”, A. Ordoñez e F. Candela (1958). Chamada de “La Flor” pelos habitantes da cidade, a casca tem um diâmetro máximo de 42,3m, vãos entre apoios de 32,3m e uma espessura média de apenas 4cm.

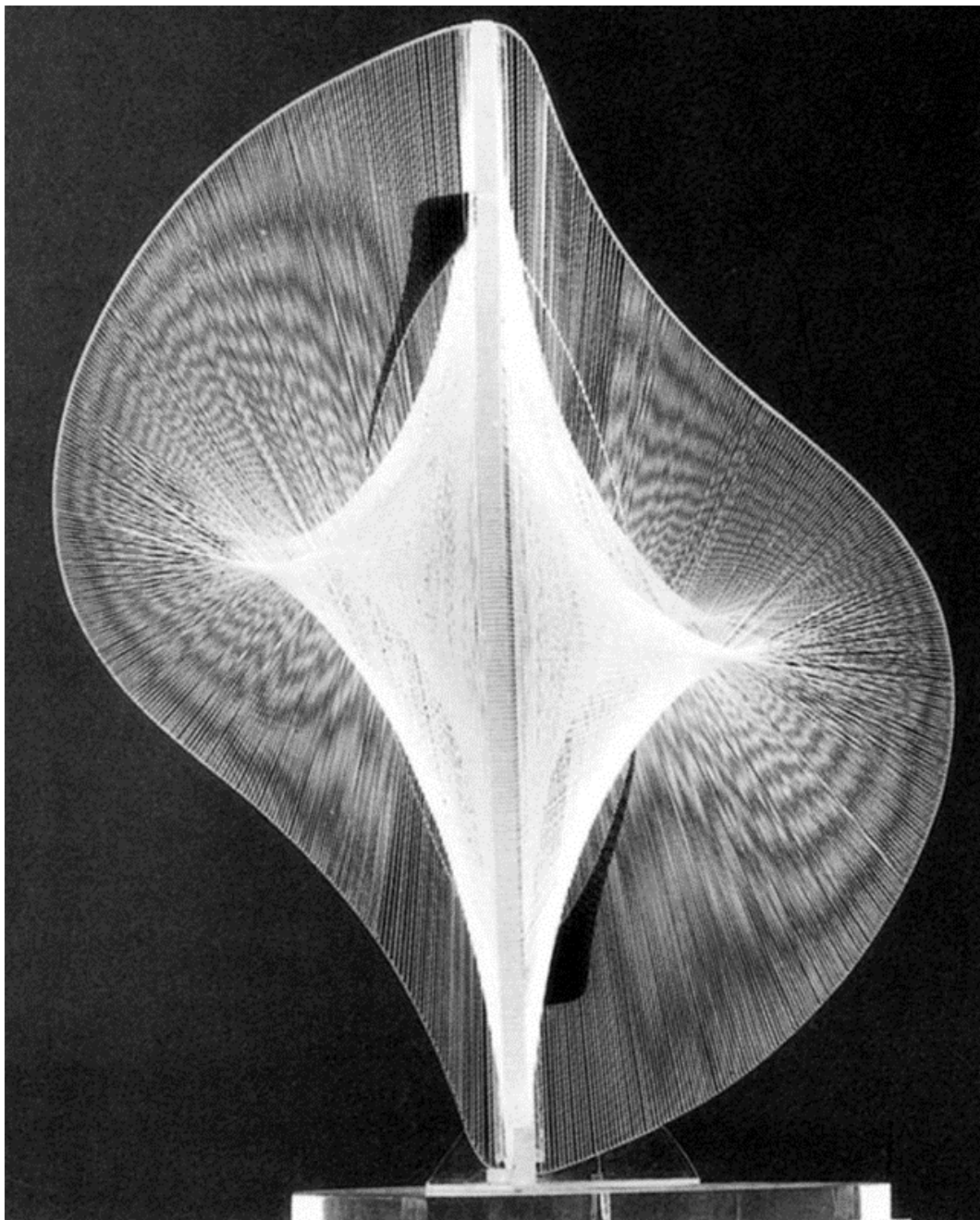


Fig. 106 – As esculturas desenvolvidas por Naum Gabo (1890/1977) demonstram algumas das infinitas possibilidades formais de superfícies regradas com perímetros curvilíneos.

Como referido, nos anos 60 surgem novas técnicas experimentais de procura da forma com modelos estruturais homotéticos. Uma dessas técnicas é a das membranas suspensas invertidas desenvolvida por Heinz Isler (descrita anteriormente no capítulo 2.3). Este método permitiu criar cascas antifuniculares extremamente eficientes em pura compressão.

A fábrica de Sicli, em Genebra (1969) é uma das obras mais complexas de Isler. Composta apenas por uma casca com sete apoios o pavilhão assimétrico é formado por duas colinas que se intersectam gentilmente, originando entre elas, um vale contínuo e um espaço vazio parecido à forma de uma gota de água (usada como jardim de Inverno).

A construção de cascas antifuniculares foi feita através de cimbres curvilíneos em grelha, cujos vazios eram, em seguida, preenchidos por tábuas. Todavia, o elevado custo da estrutura de madeira impediu a utilização da técnica em conjuntos estruturais mais complexos e, para evitar o seu desperdício, algumas obras de Isler possuem as mesmas formas e cimbres (além de economicamente viável, esta solução possibilitou a criação de um ritmo espacial interessante (ver o Centro de Ténis em Burgdorf (1980), ou o Museu da Força Aérea Suíça em Dübendorf (1987)).



Fig. 107 – Vista aérea da fábrica de Sicli, em Genebra (1969) de Hilberer C. e Isler H. A parte com maior dimensão da casca tem um vão de 30 a 35 metros de comprimento, a diagonal do conjunto tem um vão com cerca de 58 metros e a espessura geral da casca é de 10 centímetros. Este rácio é superado sem a utilização de vigas, ou qualquer elemento estrutural adicional.



Fig. 108 - O conceito estrutural de Isler para a criação de casca finas de betão lembra a importante relação entre a forma e as características naturais dos materiais.



Fig. 109 – Jardim de Inverno formado pelo vazio da intersecção das duas partes da casca.

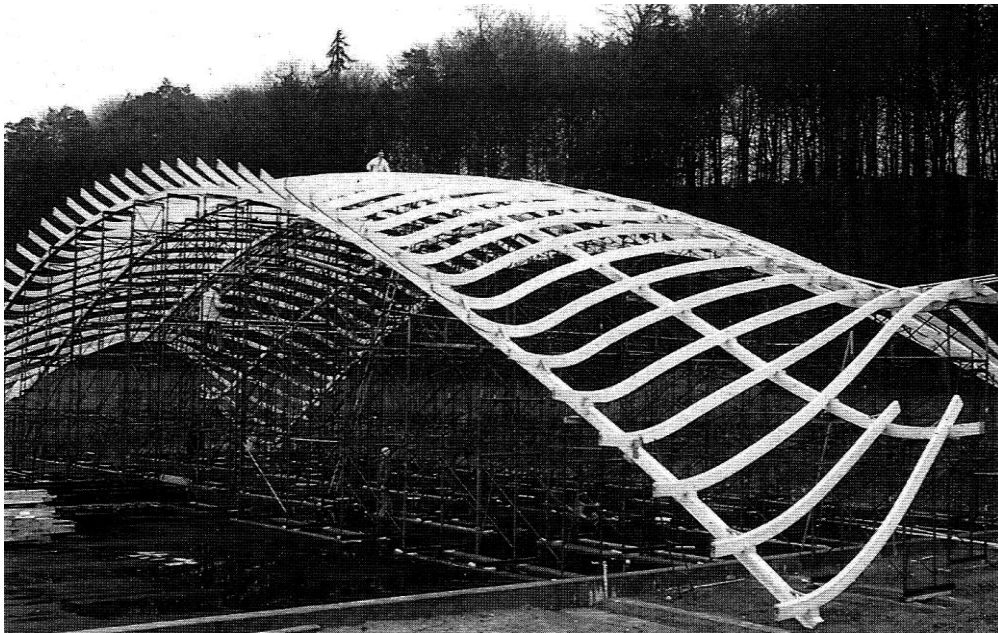


Fig. 110 – Imagens do processo construtivo de diferentes cascas de Isler. De cima para baixo observa-se a estrutura primária de madeira do cimbrio. Esta era posteriormente coberta por uma estrutura secundária de tábuas onde, depois, eram colocados os varões de aço (que permitiam o aumento da resistência a esforços de tração) que reforçavam o betão enfim projetado, vibrado e alisado sobre a estrutura.⁶⁵

⁶⁵ Para mais informações: “Heinz Isler - The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture” (2000) de Chilton J.

Após tantas evoluções as cascas consolidaram-se como um sistema construtivo para estruturas de grande vão. Durante o período mais significativo do seu desenvolvimento, entre 1950/60, estas estruturas foram a manifestação de um pensamento e movimento arquitetónico, o Expressionismo Estrutural. Porém, a partir dos anos 60, surgiu uma nova atitude de libertação formal, uma atitude que não considera como prioridade a otimização e “honestidade” estrutural. Este princípio continuou a ser um valor, contudo, sobrepuseram-se a ele valores estéticos, simbólicos e programáticos que exprimissem uma ideia de progresso e inovação tecnológica. Oscar Niemeyer, Eero Saarinen e Jørn Utzon são alguns dos preconizadores desta atitude conceptual.

Esta predisposição ideológica originou projetos com dinâmicas espaciais únicas. Contudo, importa refletir sobre os perigos que a negligência estrutural pode provocar.

Embora se tenha tornado um dos símbolos mais emblemáticos da arquitetura do século XX, a Ópera de Sidney foi um dos projetos mais controversos de sempre. Inicialmente avaliado em 7 milhões e meio de dólares e um período de construção de 6 anos, o projeto teve um custo final de 102 milhões de dólares e demorou 16 anos a ser completado. Um dos vários motivos que gerou esta discrepância entre a previsão e a realidade foi a incongruência entre a forma e as forças da estrutura: a forma do arco ogival da secção transversal de qualquer uma das cascas não concorria com a linha de pressões, produzindo momentos extremamente difíceis de suportar.

“(…) el ejemplo de la Ópera de Sidney, y sobre todo la observación de la enorme diferencia entre la esbeltez y ligereza de la concepción original de las bóvedas y la pesadez y complicación de la estructura definitiva, debiera hacernos pensar en la conveniencia de contrapesar la actitud de soberbia frente a los problemas arquitectónicos con una cierta dosis de humildad y conciencia de las limitaciones estructurales y humanas.”⁶⁶

Félix Candela

⁶⁶ “(…) o exemplo da Ópera de Sydney, e especialmente a observação da enorme diferença entre a esbelteza e a leveza da conceção original das abóbadas e o peso e a complicação da estrutura final, devem nos fazer pensar na conveniência de contrabalançar a atitude de soberba diante dos problemas arquitetónicos com uma certa dose de humildade e consciência das limitações estruturais e humanas.” Candela, F. em *El escándalo de la Ópera de Sidney* (1968).



Fig. 111 - Projetado por Eero Saarinen, e estruturalmente analisado por Ammann & Whitney, o Trans World Flight Center (1962) é um dos modelos do otimismo Neo-Futurista e da liberdade de exploração geométrica. Todavia, as formas do terminal não são a consequência de uma lógica estrutural otimizada, de modo que foi necessário o aumento significativo da espessura dos apoios (alguns com espessuras aproximadas de 6,5 metros).



Fig. 112 – Ópera de Sidney, projeto de arquitetura de Jørn Utzon, e análise estrutural de Ove Arup

Atualmente, a maioria das cascas estruturalmente eficientes são geradas através de processos de procura da forma digitais ou da otimização de formas livres. Os métodos de otimização possibilitam uma criação desprendida da superfície inicial, pois esta é submetida a uma análise estrutural (à posteriori) e à sua sucessiva otimização. Tal como na maioria das estruturas naturais, esta otimização evolutiva é o resultado da adaptação da forma a distintos parâmetros como a gravidade, rigidez e propriedades dos materiais. Assim, as cascas geradas através da otimização estrutural tendem a ser completamente distintas das geometrias funiculares pois a sua forma resulta de uma exploração inicial absolutamente livre (Fig. 113 e 114).

Concluindo, ao longo do séc. XX e início do séc. XXI consagrou-se um novo método construtivo - as cascas de betão armado e pré-esforçado. Este avanço procedeu-se através de inúmeras evoluções: materiais (na qualidade do betão e do aço) tecnológicas (na execução de diferentes tipos de cofragens e escoramentos) estruturais (através do cálculo e de processos de procura da forma) e económicas (a mão-de-obra barata, a crescente globalização, o acesso a novos materiais e a standardização).

Contudo, tão importante quanto estas evoluções foi a transformação das apreciações estéticas e a procura por uma arquitectura estruturalmente honesta.

Esta atitude repercutiu-se na economia estrutural e construtiva. As estruturas de Heinz Isler, por exemplo, demonstram uma economia gerada pela criação de uma harmonia estrutural entre a forma, as forças e os materiais. Por outro lado, as estruturas de Félix Candela são exemplo de uma economia gerada pela utilização de um processo construtivo prático com formas estruturalmente eficientes.

Atualmente o desenvolvimento digital permitiu a exploração de novos métodos de procura da forma e otimização estrutural, métodos que rompem as fronteiras convencionais da arquitetura e preconizam novas perspetivas de futuro.



Fig. 113 – Com linhas suaves e onduladas a cobertura do Crematório de Kakamigahara em Gifu (2006) flui levemente ao lado do lago que a reflete. Com uma espessura média de 20cm, a casca transforma-se em colunas dispersas no espaço, criando uma harmonia compositiva simbólica reconfortante. Projeto de Toyo Ito e otimização de Mutsuro Sasaki Consultants.

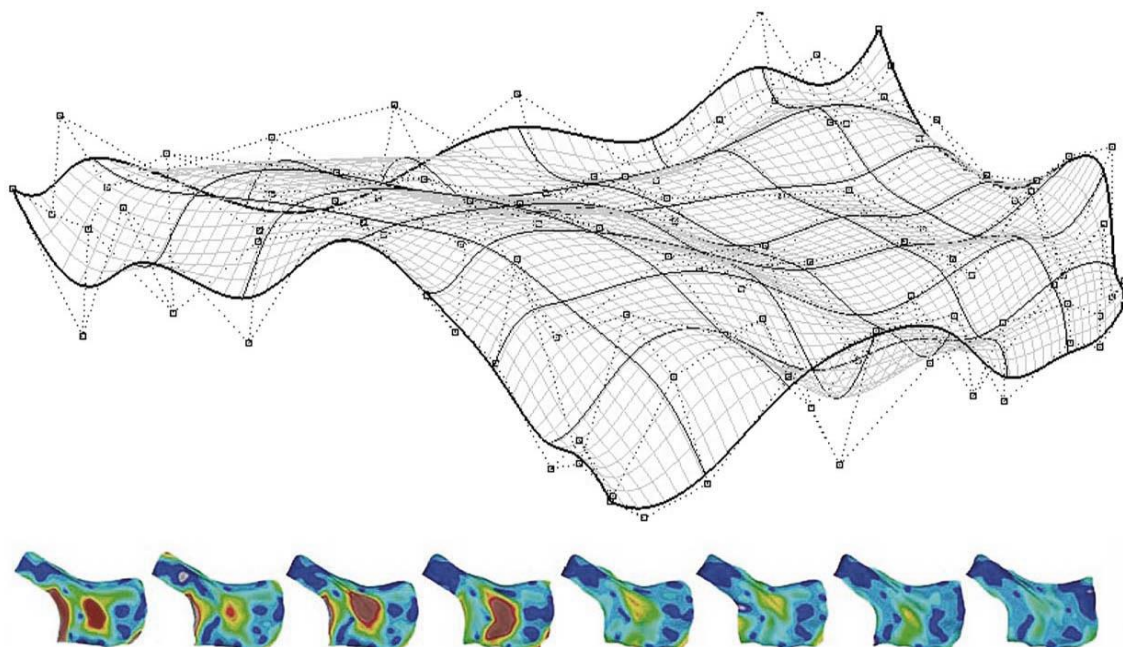


Fig. 114 - Estudo de Alberto Pugnale sobre a otimização computacional da forma do Crematório de Kakamigahara (2008). Os parâmetros utilizados para a otimização da forma procuraram que esta resistisse a esforços axiais de compressão e a uma certa fração de esforços de tração e flexão (para esmorecer o movimento de terremotos ou outras cargas dinâmicas). A otimização da forma inicial pode gerar várias possibilidades que permitirão a seleção da forma mais adequada.

4.3 Moldes de tecido

“I then started to think about concrete (...) and wanted to reflect its fluid condition in some way, set it apart from the remain materials that arrive solid at the construction site. Stone is carved, brick is pressed in a mold, but concrete is a material that is poured in a doughy state. (...) This was the beginning of research that led me years later to the flexible formwork”.⁶⁷

Miguel Fisac

Como é que de um material fluído como o cimento acabam por surgir tantos sólidos prismáticos? Assim como é difícil desenhar uma curva com uma régua é difícil conceber estruturas de betão curvilíneas com cofragens e moldes rígidos. Para conceber formas curvilíneas é necessária a utilização de uma fronteira flexível – o tecido.

Quanto maior a deformabilidade do sistema, mais a sua forma se aproximará às forças a que está sujeita. Este é o princípio essencial por trás do desenvolvimento de estruturas através de cofragens têxteis (ou moldes de tecido).

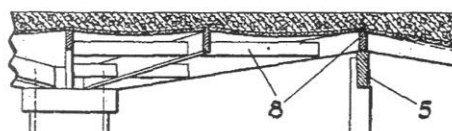
Um sistema formado por um molde têxtil (fechado ou aberto) tira partido das características fundamentais do material que o preencherá: a sua deformabilidade inicial. Enquanto fluído, este material (seja o cimento, o gesso, a resina epoxídica ou qualquer outro aglomerante) pode assumir qualquer forma, e assim permanecerá em estado sólido desde que a sua estabilidade seja assegurada.

Apesar dos moldes de tecido nunca se terem consolidado como uma técnica construtiva vulgar, a sua utilização com materiais cimentícios tem mais de um século. Os primeiros exemplos registados de moldes têxteis foram desenvolvidos no fim do séc. XIX. Em 1897, Gustav Lilenthal (1849-1933) patenteou aquele que viria a ser o primeiro sistema construtivo de tetos à prova de fogo concebido através de cofragens têxteis.

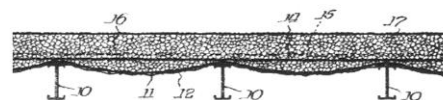
⁶⁷ “Comecei a pensar no betão (...) e queria refletir de alguma forma a sua condição fluida, diferenciando-o dos restantes materiais que chegam sólidos ao local de construção. A pedra é esculpida, o tijolo é prensado em um molde, mas o betão é um material que é derramado em um estado pastoso. (...) Esse foi o começo de uma pesquisa que me levou, anos depois, às cofragens flexível ”. Miguel Fisac conforme citado por Fernandez-Galiano, L. 2003. AV Monografias 101. Miguel Fisac. Madrid: Arquitectura Viva.



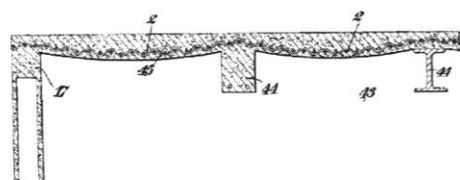
Fig. 115 - Sistema construtivo de tetos à prova de fogo patentado por G. Lilienthal sob o nome "Terrast Decke" (1897).



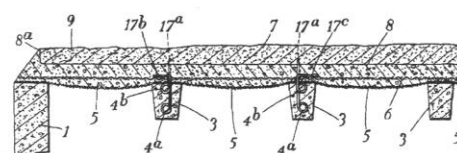
a.



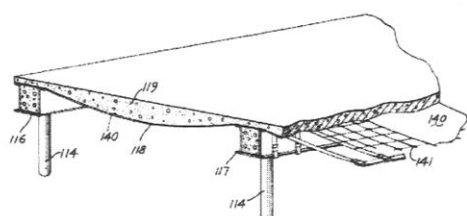
b.



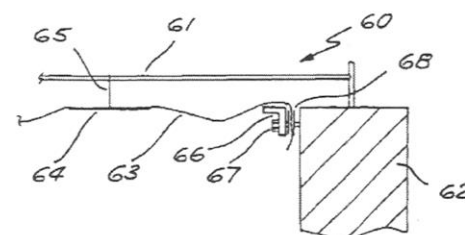
c.



d.



e.



f.

Fig. 116 - Ao longo do séc. XX surgiram várias patentes de sistemas construtivos que incorporam diferentes inovações técnicas ao sistema de G. Lilienthal: a. Fletcher (1917); b. Govan e Ashenhurst (1928), c. Waller (1934); d. Farrar e outros (1937); e. Parker (1971); f. Redjvani (1999).

O processo de Lilienthal é simples: em primeiro, o tecido impermeável é suspenso sobre vigas, depois, é coberto com redes de arame e, finalmente, é derramado cimento sobre ele. O tecido suspenso entre as vigas, forma catenárias (o que permite a distribuição uniforme das pressões à tração).

As formas que surgem do processo de Lilienthal são os momentos fletores da laje (funiculares) e as cargas impostas são suportadas pelo tecido à tração.

Além de introduzir um novo campo de possibilidades geométricas e construtivas, esta simples técnica permitiu uma economia de meios: tanto das cofragens (pela substituição da madeira pelo tecido) como de mão de obra (uma vez que é rápida e fácil de construir). Apesar da inovação, a cobertura à prova de fogo foi utilizada apenas em algumas casas suburbanas de Lichterfelde e no hospital Königin-Elisabeth em Berlim (demolido em 2013).

A técnica nunca chegou a ser divulgada e muitas dos autores das patentes publicadas semelhantes ao sistema “Terrast Decke” (Fig. 117) não tinham conhecimento da obra de Lilienthal.

A próxima grande evolução conceptual e construtiva e estrutural da utilização de moldes de tecido surgiu com James Waller (1884-1968).

Durante a 1ª Guerra Mundial, Waller encontrou uma estrutura tracionada cujo o processo construtivo teve uma profunda influência no seu percurso. Com intenção de camuflar a sua tenda, um soldado decidiu rebocá-la com cimento. Contudo, para surpresa de ambos, o reboco deu uma tal resistência ao tecido que foi possível remover os seus suportes sem o colapso da tenda. Esta solução foi reveladora para Waller: além de perceber que o processo poderia resolver uma carência imediata (a falta de cimbrês e cofragens), compreendeu que o princípio poderia ser aplicado em uma ampla variedade de formas funiculares.

Foi deste incidente que Waller iniciou a sua investigação sobre cofragens têxteis. Em 1934, criou o sistema “Nofrango” que, em 1942, evoluiu para o sistema “Ctesiphon” – o primeiro método de aplicação de cofragens têxteis em cascas polifuniculares.

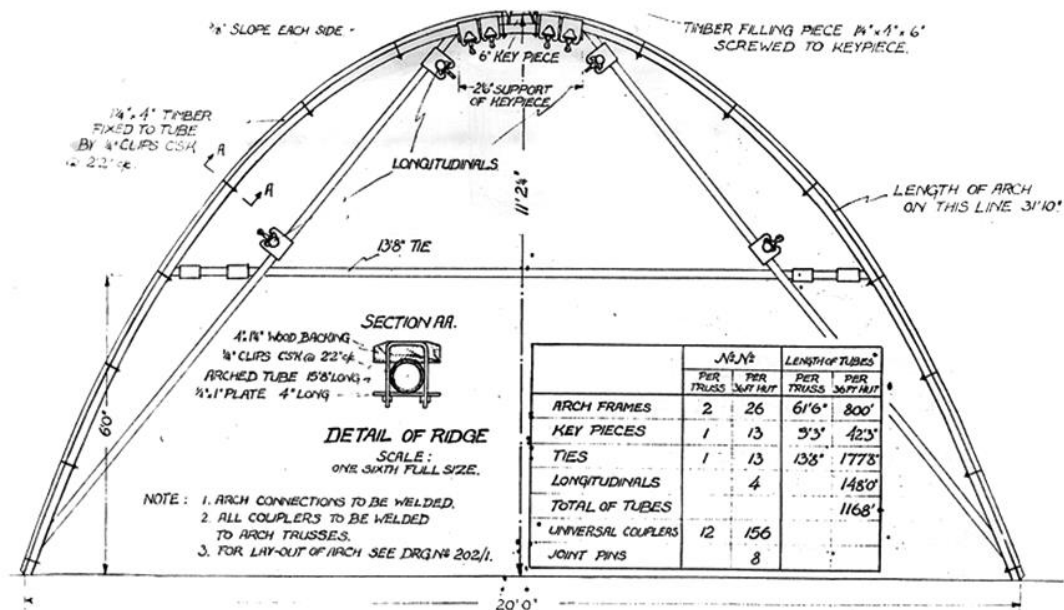
A concepção do sistema “Ctesiphon” foi inspirada numa grande estrutura que Waller observou durante a viagem que realizou ao Iraque em 1922 – a Taq-i-Kisra, a grande abóbada da antiga cidade imperial da Mesopotâmia, Ctesifonte.

O que mais influi para a criação do sistema “Ctesiphon” foi a forma, a grande catenária. Waller compreendeu que era a geometria que permitia a eficiência estrutural da abóbada. Não só o vão tem 30 metros de altura e uma área de 24 metros de largura por 48 metros de comprimento, como foi preservado ao longo de milénios (estima-se que o complexo foi erigido entre 540 a 240 a.C.).

O processo de construção do sistema “Ctesiphon” (Fig. 118 e 119) consiste na suspensão de faixas de membranas têxteis sobre arcos catenários que, em seguida, são rebocadas com cimento. As formas que resultam deste método são anticlásticas, sendo a curvatura negativa controlada pela relação entre o espaçamento dos arcos, a quantidade de tecido entre eles, o peso da primeira camada de reboco e a elasticidade do tecido.



Fig. 117 - O arco de Ctesifonte, ou Taq-i-Kisra, localizado na atual cidade iraquiana Salman Pak, a sul de Bagdade.



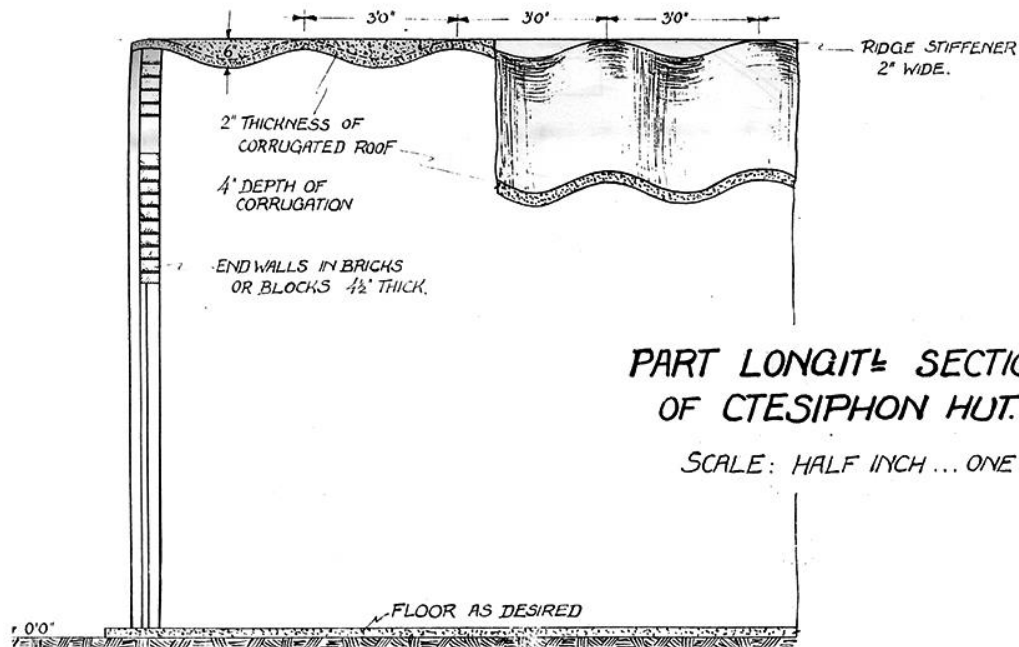
FALSEWORK FOR CTESIPHON HUT.

SCALE: HALF INCH ... ONE FOOT.

FEBRUARY 1942.

DRG. N° 202/5.

J.H. de W. WALLER M.I.C.E., M.Sc.
100 VICTORIA STREET S.W.I.



PART LONGIT. SECTION OF CTESIPHON HUT.

SCALE: HALF INCH ... ONE FOOT.

FEBRUARY 1942.

DRG. N° 202/4.

J.H. de WALLER M.I.C.E.
100 VICTORIA STREET, S.W.I.

Fig. 118 – Pormenor construtivo do sistema "Ctesiphon".

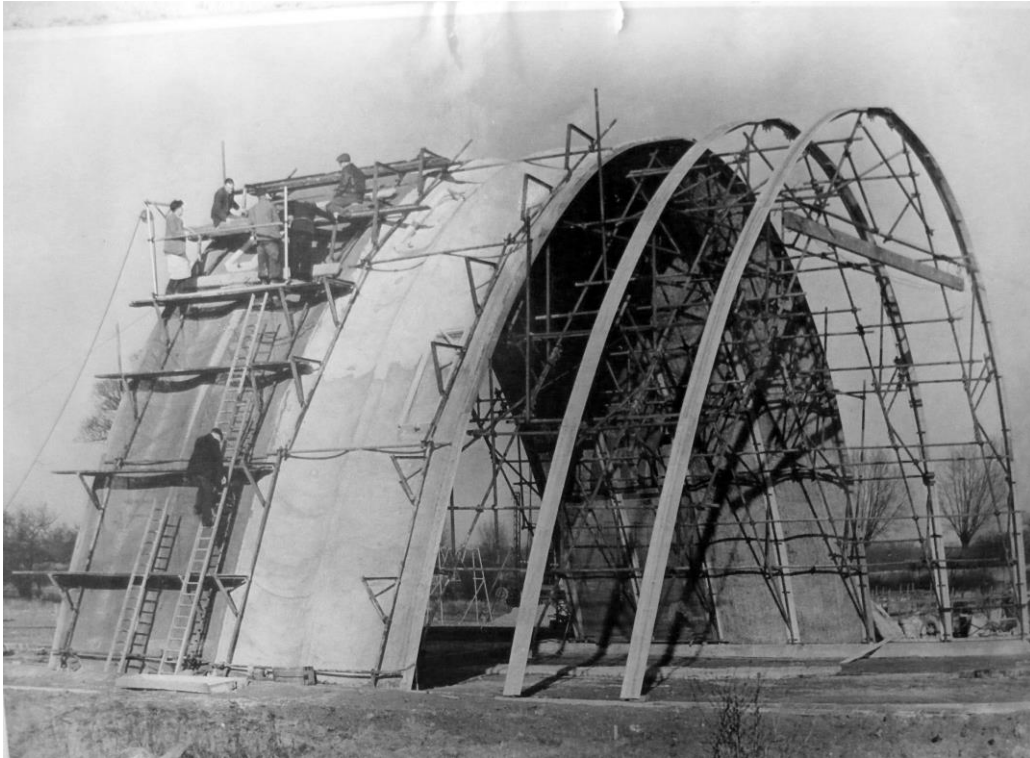


Fig. 119 - Com espessuras extraordinárias de 2,5cm os primeiros protótipos cobriram vãos de 32m. As últimas estruturas de Waller permitiam, porém, cobrir áreas de 150m com espessuras mínimas de 13cm. Para tal, foram utilizados arcos de treliças e aço pré-esforçado nos quais o tecido era suspenso. O reboco final era feito através de cimento projetado.

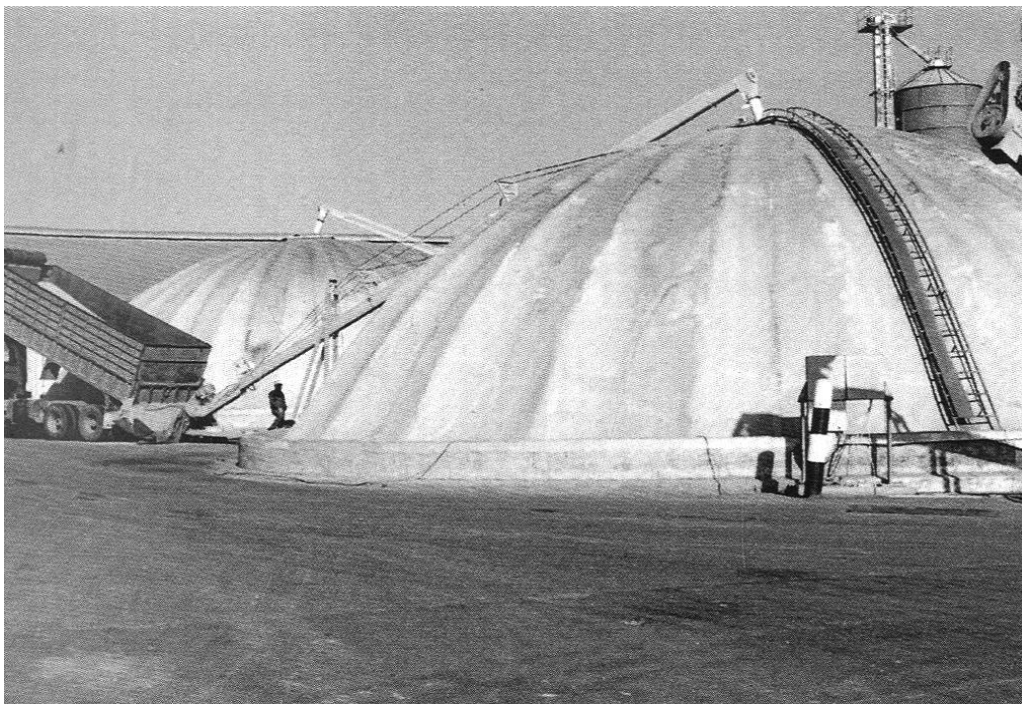


Fig. 120 – Silos para armazenamento de cereais em Nicosia, Chipre (autor desconhecido). O princípio latente no sistema de Waller pode ser explorado de inúmeras maneiras e originar as mais variadas formas polifuncionais.

Até aos anos 60, a utilização de moldes têxteis foi feita por dois motivos essenciais: pela economia de meios (através da minimização de trabalho e material); e pela eficiência e elegância estrutural. Contudo, Miguel Fisac (1913-2006) deu um novo propósito à utilização de moldes têxteis, um propósito que é sentido numa outra escala, a escala do tato.

Ao contrário de Waller, Fisac não utilizou as cofragens têxteis apenas pela sua extrema eficiência e elegância estrutural. Aliás, o sistema estrutural do Centro de Reabilitação de MUPAG (a primeira obra onde utilizou cofragens têxteis) é o pórtico comum. Todavia, Fisac utilizou as cofragens têxteis com outro propósito – para imprimir nele a ampla variedade de contrastes e sensações tácteis do tecido.



Fig. 121 - Centro de Reabilitação de MUPAG

A construção de cascas de betão armado é um processo que pode tornar-se difícil e dispendioso devido à preparação de cofragens e cimbres complexos e à configuração e colocação de armações curvilíneas. Contudo, a disseminação de novos processos de procura da forma possibilitou a invenção de soluções que podem ser mais simples e acessíveis, entre elas, as estruturas pneumáticas.

As estruturas pneumáticas são estruturas infladas cuja geometria é resultante de diferenças de pressão numa membrana têxtil. Assim, são geometrias que não requerem qualquer cimbra. Existem dois grupos essenciais: as sustentadas pela pressão do ar, e as enrijecidas após a sua formação.

As estruturas pneumáticas são extremamente resistentes a esforços pressurizados de tração, contudo são formas ineficientes para resistir aos esforços resultantes da ação da gravidade e do vento. Isto significa, que os esforços transversos (das estruturas enrijecidas com betão) devem ser atendidos com armaduras tracionadas (ferro-cimento, cabos ou varões de aço).

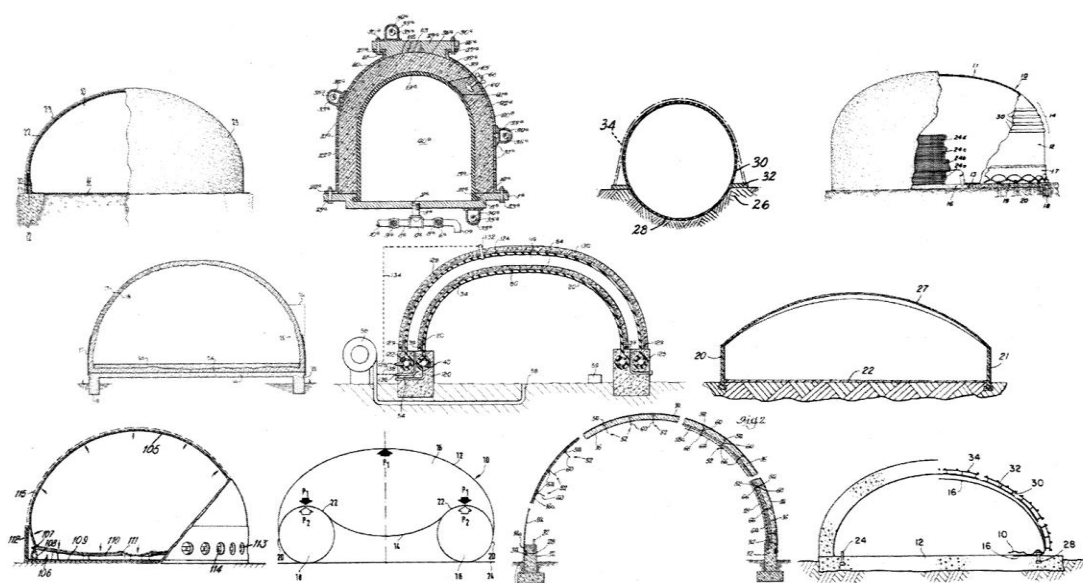


Fig. 122 – Diferentes patentes de estruturas pneumáticas enrijecidas. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: Neff (1942), Baily (1943), Bilner (1953), Neff (1959), Turner (1961), Bini (1969), Harrington (1971), Heifetz (1972), Prouvost (1977), South and South (1979) e Hale (1988).

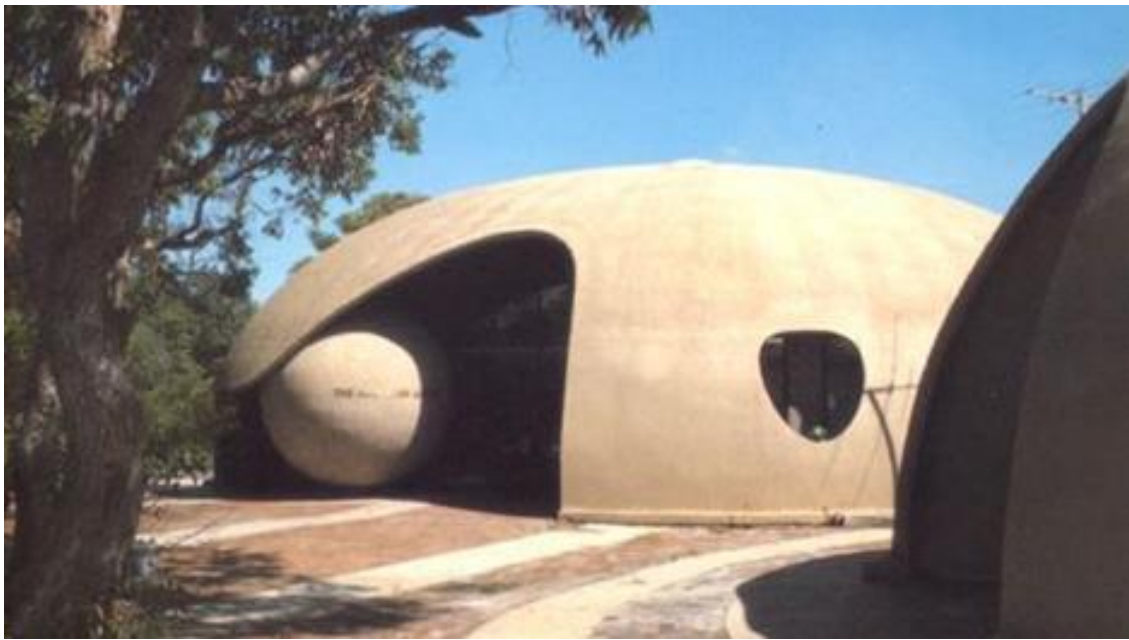


Fig. 123 –Escola pública de Narrabeen North (1974). Inventadas nos anos 60, as cascas pneumáticas de Dante Bini, as “Binishells”, tiveram uma longa evolução ao longo das décadas. As “Binishells” derivavam de uma única célula pneumática confinada por um perímetro circular que, em seguida, era seccionada (para conceber as fenestrações ou a conexão a outras células).



Fig. 124 - Recentemente, Nicolás Bini (o filho) criou um novo sistema de “Binishells”. Segundo a companhia, as melhorias sobre o sistema original permitem uma maior flexibilidade arquitetónica (sobretudo na conformação da planta), simplificação do processo de construção e integração de tecnologias passivas de aquecimento / refrigeração.

Apesar das estruturas pneumáticas enrijecidas apresentarem uma solução plástica, económica e ecológica promissora, a maioria das cascas com diversas células copuladas não foram construídas com membranas pressurizadas, mas da projeção de cimento em armações compostas por varões de aço e ferro-cimento. Ao contrário dos sistemas pneumáticos, este processo, aumenta significativamente o tempo e custo de obra. Citando Antti Lovag: “I don't know what it's going to be like, I don't know when it's going to be finished, and I don't know how much it's going to cost.” ⁶⁸



Fig. 125 – Perspetiva exterior e interior do “Palais Bulles” (construído entre 1975 a 1989) de Antti Lovag.

⁶⁸ “Não sei como vai ser, não sei quando vai terminar e não sei quanto vai custar.” Citação retirada do artigo de Sveiven, M. (2011) em “AD Classics: Palais Bulles / Anti Lovag”. ArchDaily.

Quando analisamos as primeiras experiências do desenvolvimento de cofragens têxteis percebemos que existe pouca literatura científica (grande parte é composta por patentes) e que os envolvidos não estavam muitas vezes conscientes da existência uns dos outros. Porém, a facilidade de comunicação atual e a criação de centros de investigação tem mudado esse paradigma. Um dos preconizadores desta sinergia é o grupo CAST da Universidade de Manitoba, Canadá. Fundado nos anos 90 por Mark West, o grupo promoveu o contacto entre os vários autores e, em 2008, fundou a International Society of Fabric-Forming (ISOFF). A investigação desenvolvida pelo grupo CAST centra-se em vários aspetos materiais, estruturais e estéticos de moldes de tecido abertos e fechados sendo algumas das principais investigações a procura de novas abóbadas funiculares e de estruturas arborescentes funiculares com moldes têxteis fechados (ver Fig. 126).

Apesar dos moldes têxteis não serem muito utilizados, eles presenteiam qualidades que ainda estão por explorar: não requerem muito mais do que cimento e tecido; é possível uma economia de meios em material, armazenamento, transportação e tempo (devido ao peso, custo, compactação e reutilização do tecido); uma utilização eficiente de moldes têxteis permite a diminuição da quantidade de cimento (amenizando o impacto energético e a emissão dos gases de estufa); e através da manipulação do tecido (esticar, suspender, torcer ou encher) pode-se criar uma ampla variedade de formas geométricas que decorrem das forças à que estão sujeitas.

“The use of flexible moulds for concrete construction represents a very simple technical change - one common material (plywood, for example) is replaced with another (a plastic tarp, for example). Yet, the results of changing rigid panels for flexible membranes have profound repercussions for sculptural, architectural, and structural form, as well for construction logistics and economy.”

Mark West ⁶⁹

⁶⁹ “O uso de moldes flexíveis para construção em betão representa uma mudança técnica muito simples - um material comum (contraplacado, por exemplo) é substituído por outro (uma lona plástica, por exemplo). No entanto, os resultados da troca de painéis rígidos por membranas flexíveis têm profundas repercussões na forma escultórica, arquitetónica e estrutural, bem como na logística e economia da construção.” West M. em “The fabric formwork book – Methods for building new architectural and structural forms in concrete” (2017).

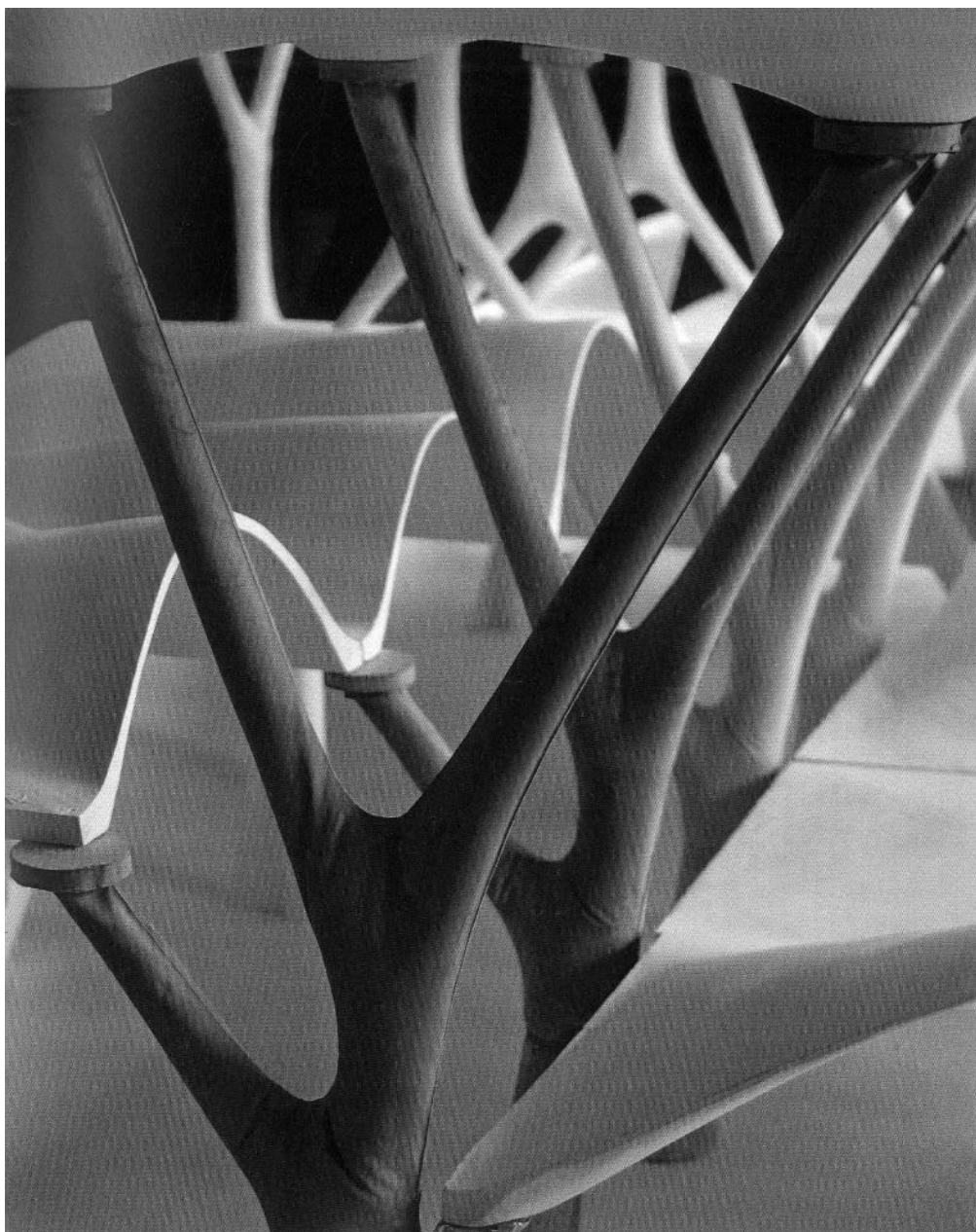


Fig. 126 – Modelo de estruturas arborescentes e abóbadas antifuniculares geradas a partir de moldes de tecido fechados e abertos. (CAST, “Team Gravity” (2007))

Parte IV

5. À procura da Forma

“When I’m working on a problem, I never think about beauty.
But when I’ve finished, if the solution is not beautiful, I know it’s wrong.”

Buckminster Fuller ⁷⁰

A materialização de uma imagem mental para a realidade física envolve um processo surpreendente. Mais ainda quando esta imagem compreende a manipulação da matéria através de forças invisíveis. Considerando a complexidade dos fenómenos, esta surpresa é frequente e dela emerge uma compreensão nova sobre a origem e as possibilidades da forma que dificilmente seria usufruída sem a realização de experiências.

Ao longo da investigação foram expostas: diferentes teorias qualitativas sobre a estabilidade de estruturas antifuniculares; alguns dos métodos físicos e digitais de procura da forma; e diversas técnicas construtivas que possibilitam a sua implementação arquitetónica.

Contudo, nesta fase, a investigação terá uma outra abordagem, uma abordagem mais experimental. Acompanhados por uma análise crítica, serão expostos ensaios físicos de modelos estáticos; de modelos cinéticos; e de diferentes modos de fixação e inversão de estruturas funiculares.

Finalmente será apresentado um novo instrumento físico de conceção de estruturas polifuniculares estáticas e cinéticas e a metodologia de registo da sua geometria em movimento para o ambiente digital.

Todas estas experiências foram realizadas pelo autor sem nenhum propósito especial além da descoberta de algumas das inúmeras possibilidades metodológicas e geométricas de estruturas polifuniculares.

⁷⁰ “Quando trabalho num problema, nunca penso em beleza. Mas se quando terminar, a solução não for bela, sei que está errada.” Fuller, B. conforme citado por Darling, J. em “The Universal Book of Mathematics” (2004).

5.1 Criação de modelos com correntes

“By involving the hands and the eyes, this process of model making draws on powerful resources deep inside our minds, which I believe contain native memories not reachable by conscious, analytical thinking.”

Horst Berger ⁷¹

Atualmente, os processos mais usados para a concepção de estruturas polifuncionares são digitais. Todavia, a arquitetura é concreta e tridimensional e, para a procura da sua forma, os processos físicos são mais intuitivos.

Este capítulo apresenta um conjunto de ensaios de modelos estáticos de correntes. As correntes são formadas por articulações que permitem a rotação dos membros em função de forças verticais opostas (a força da gravidade e a força contrária dos apoios) e forças horizontais opostas (o impulso horizontal e o impulso contrário dos apoios).

Deste modo, elas possibilitam a constante adaptação do sistema para novos estados de equilíbrio à tração, o que dispõe ao criador a visualização de inúmeras soluções de estabilidade ao longo do processo de procura da forma.

Estes modelos implicam a manipulação de três parâmetros essenciais: a localização dos diferentes pontos de ancoragem e de união; a redução e aumento dos comprimentos das correntes; e a seleção dos pesos específicos em cada elo.

Importa lembrar que a inversão das formas cria uma inversão no sentido das forças ao longo da estrutura: as estruturas funiculares (com curvatura negativa) têm apenas esforços axiais de tração e as estruturas antifuniculares (curvatura positiva) têm apenas esforços axiais de compressão. Desta maneira, a escolha dos materiais deverá ser uma consequência direta das características naturais da sua forma. A força, a forma e o material são a unidade fundadora da estrutura.

⁷¹ “Ao envolver as mãos e os olhos, o processo de criação de modelos baseia-se em poderosos recursos do fundo das nossas mentes, que eu acredito que contêm memórias nativas não alcançáveis pelo pensamento analítico e consciente.” Berger, H. em “Light Structures - Structures of Light: The Art and Engineering of Tensile Architecture” (1996).



Fig. 127 – Modelo funicular invertido através de fotografia (antifuncular). Materiais: correntes, passe-vite, argolas. (do autor)



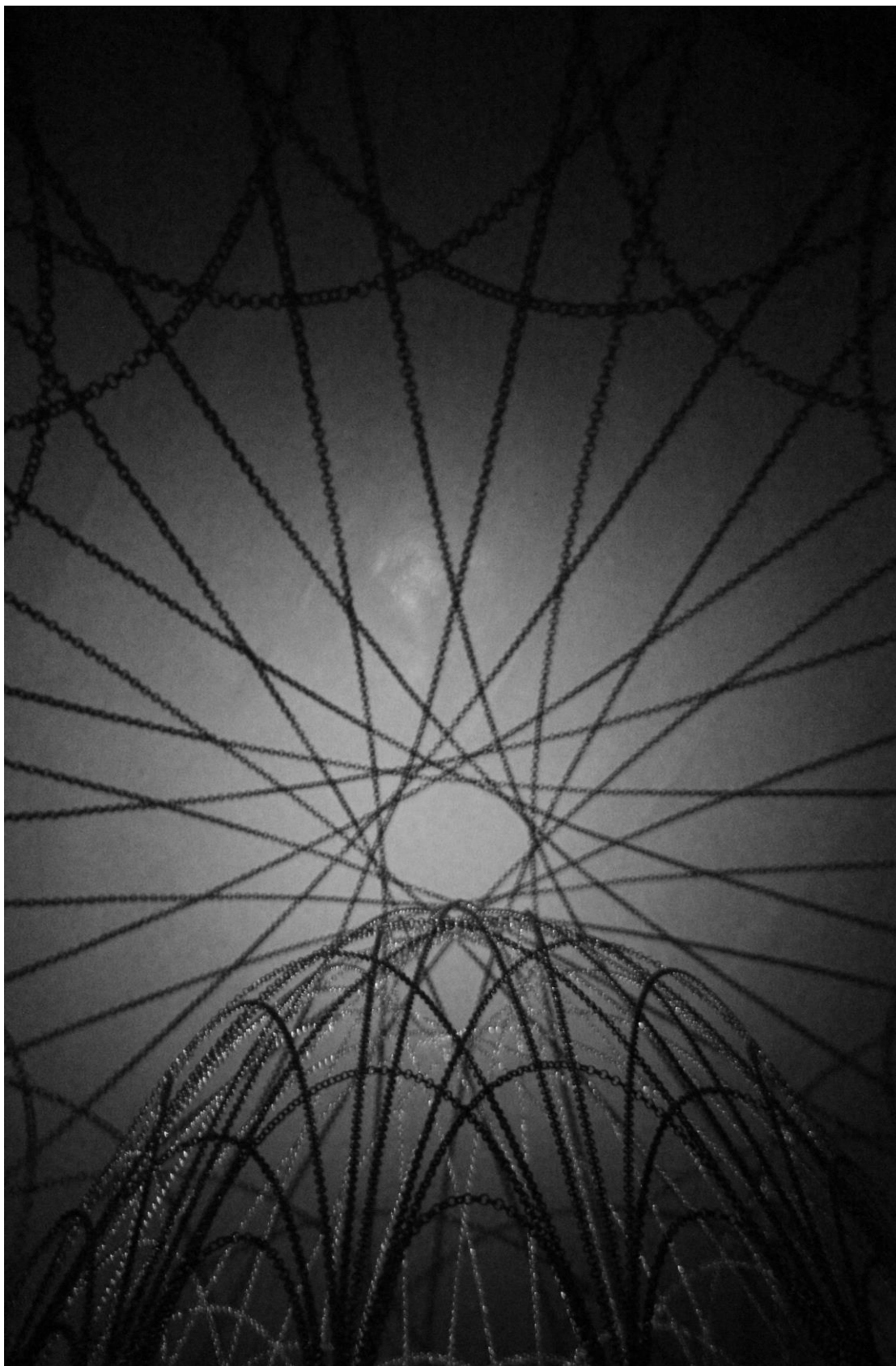


Fig. 128 – Modelo funicular e as respectivas sombras projetadas com um foco luminoso. Materiais: correntes, argolas e aro de bicicleta. (do autor)

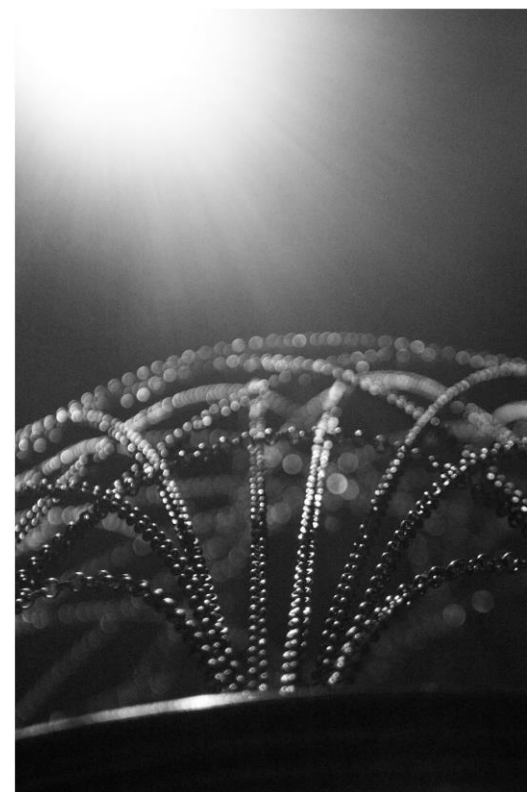
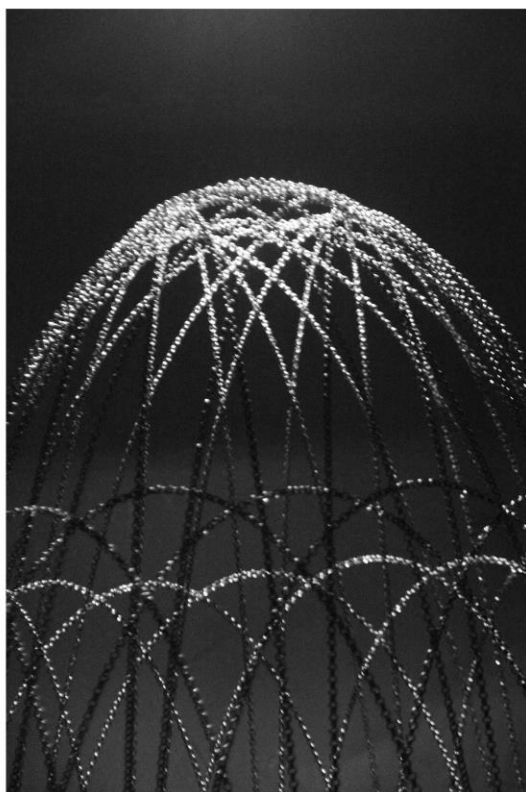
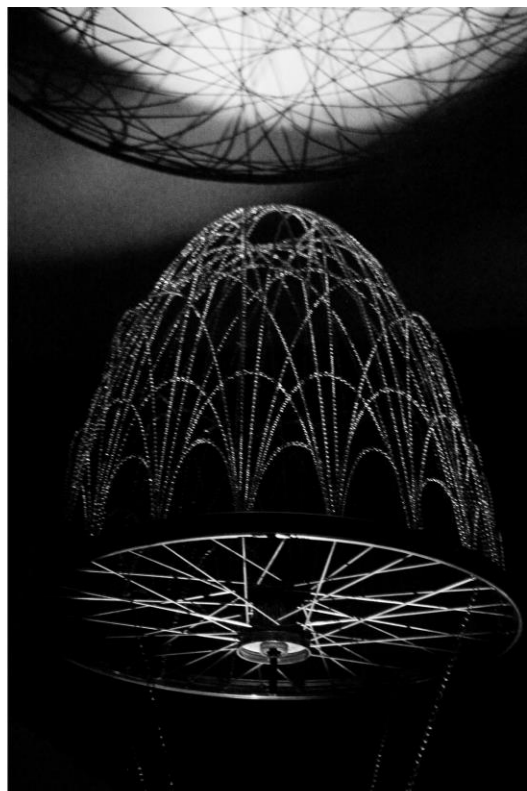


Fig. 129 – Outras perspectivas do mesmo modelo. A relação geométrica entre os arcos respeita uma criteriosa lei de proporção. Os arcos dispostos nos diversos níveis têm uma flecha cujo o comprimento é igual à distância entre os seus apoios. (do autor)

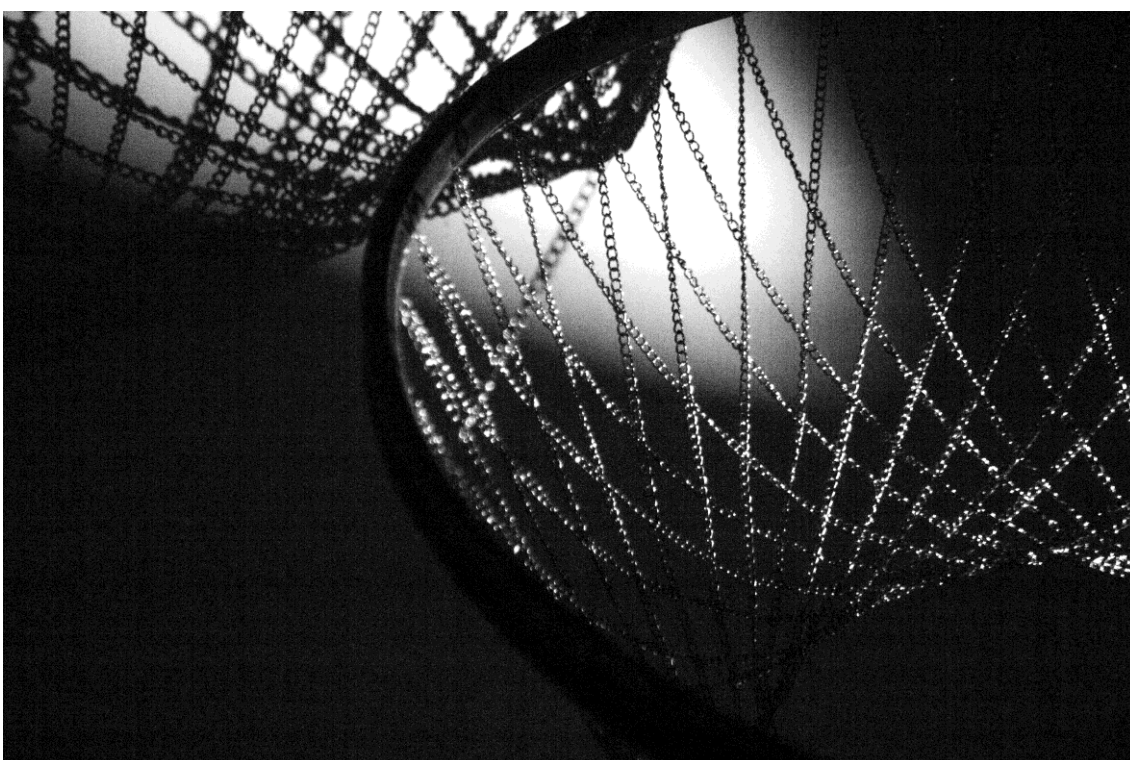
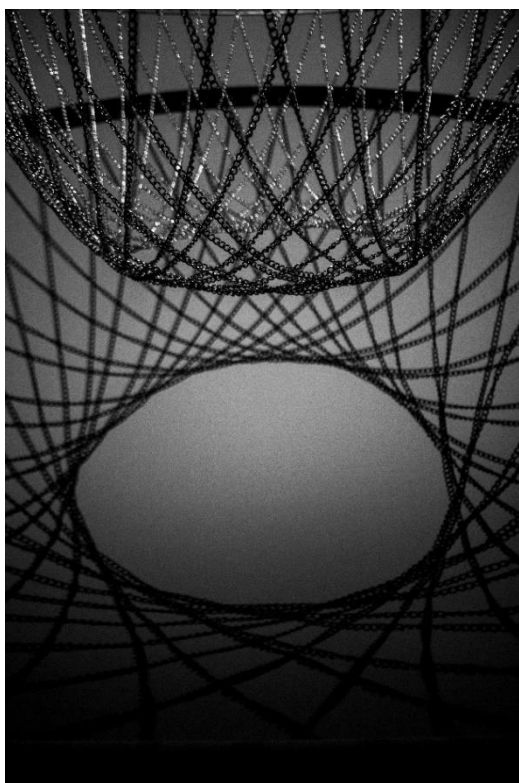


Fig. 130 – Diferentes perspectivas de um modelo realizado através da disposição radial de um arco pelos vértices de cordas de circunferência que não passam pelo seu centro. A intersecção entre os arcos cria “losangos arqueados” que diminuem progressivamente ao longo da sua ascensão ao óculo. Materiais: correntes, argolas e aro de bicicleta. (do autor)

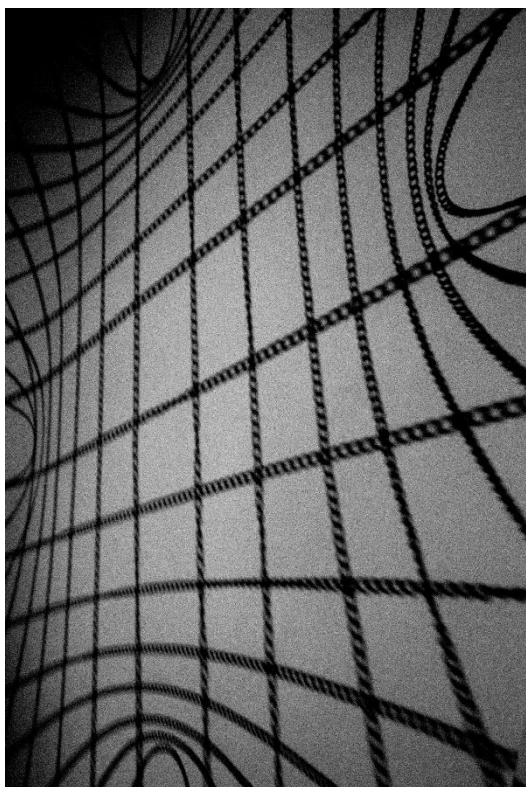


Fig. 131 – As correntes deste modelo têm a mesma extensão. Contudo a sua flecha e luz aumentam e diminuem com uma relação de proporção inversa à medida que os pontos de apoio se afastam e aproximam dos dois eixos perpendiculares da circunferência. Materiais: correntes, argolas e aro de bicicleta. (do autor)

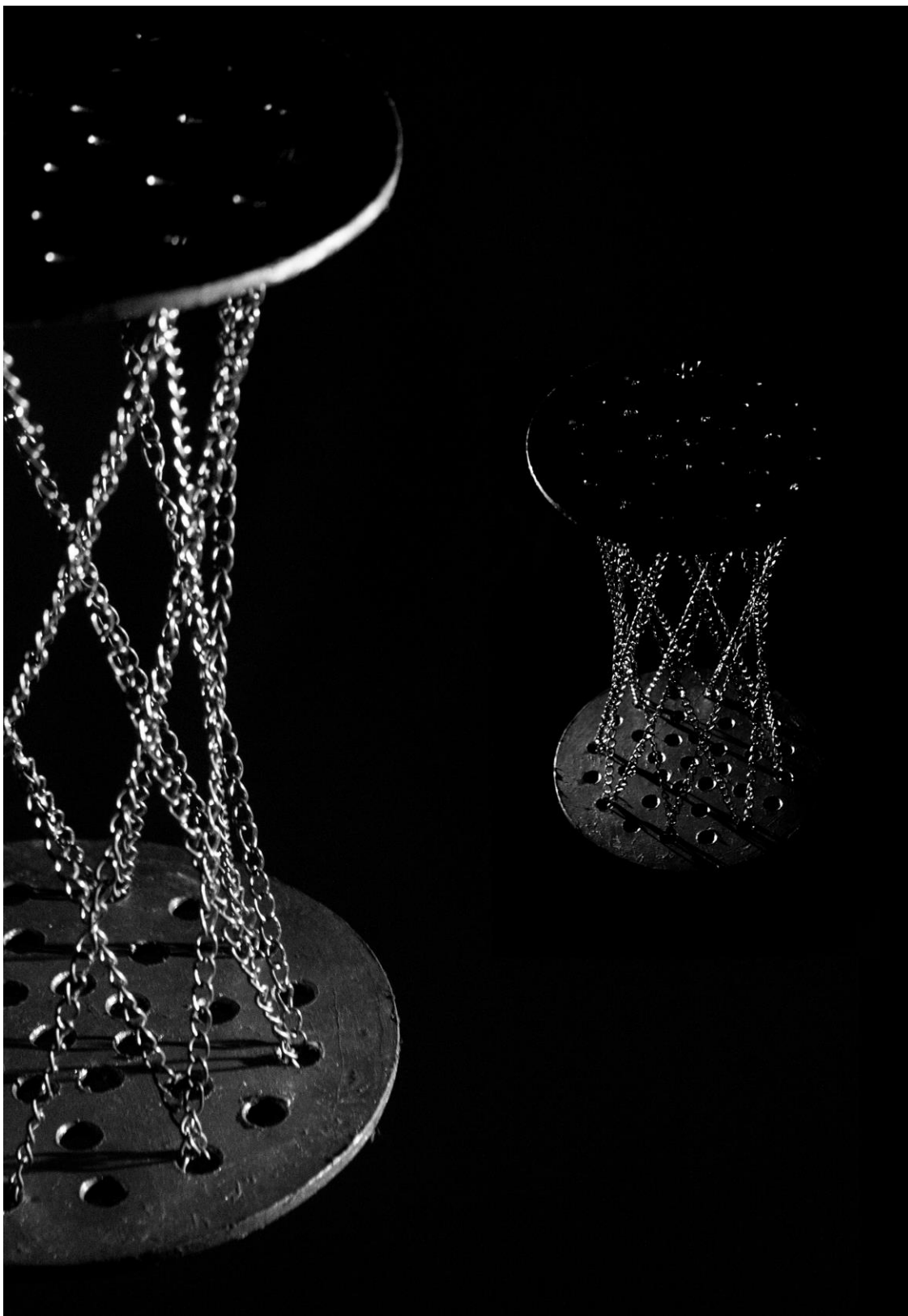


Fig. 132 - Estrutura funicular regrada de hiperboloides de revolução de sentidos opostos com bases circulares. Materiais: correntes, argolas e passe-vite. (do autor)

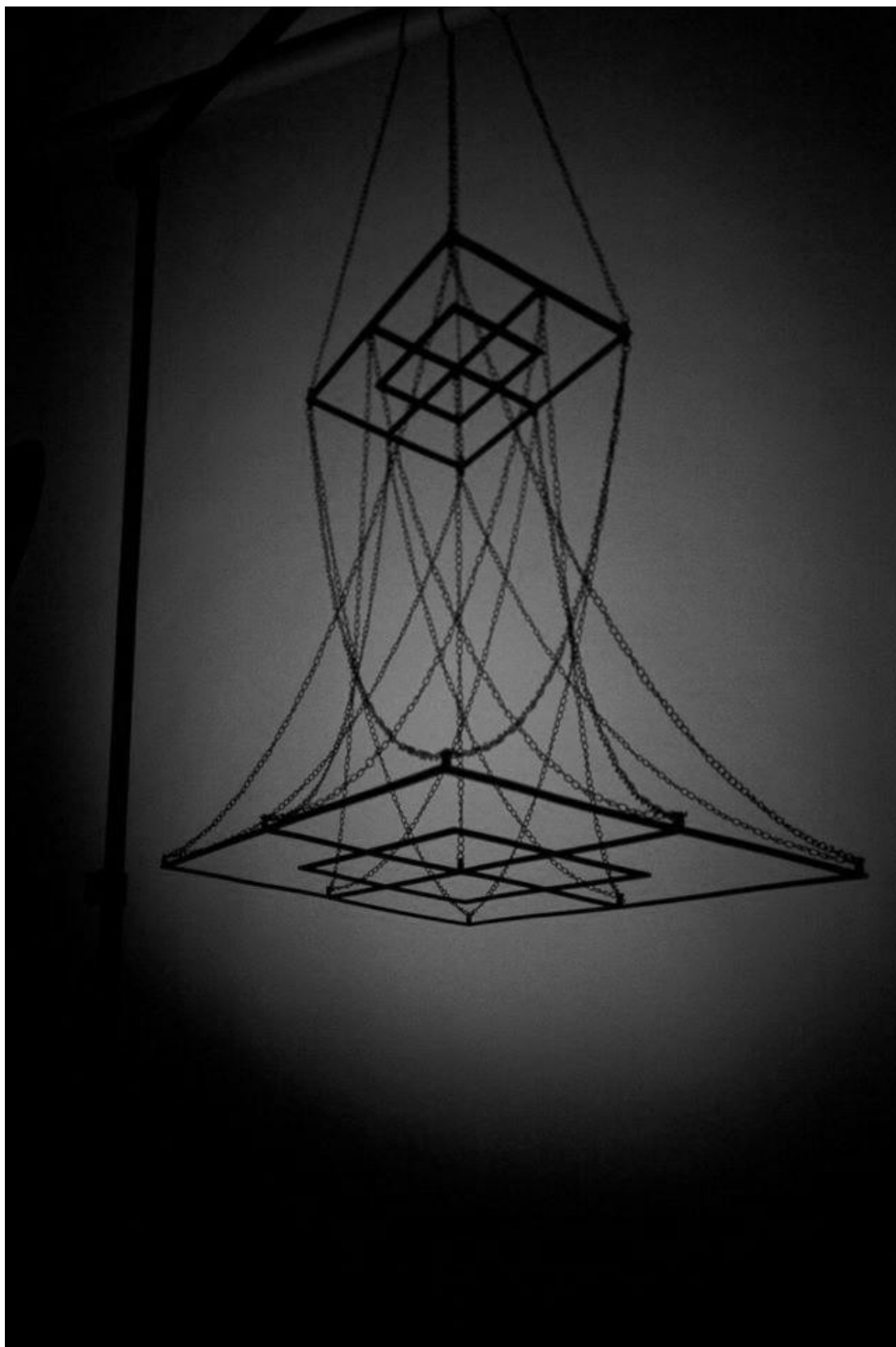


Fig. 133 – Sombra projetada de uma estrutura funicular formada por hiperboloides de revolução de sentidos opostos com bases quadrangulares de dimensão distinta. Os segmentos que formam os hiperboloides de revolução estão relaxados devido à tração da corrente central. Materiais: correntes, argolas e chapa metálica cortada a lazer. (do autor)



Fig. 134 – Duas perspectivas de uma coluna formada por dois modelos. O modelo superior é funicular e o inferior antifunicular. Este conjunto forma uma coluna que “possui uma superfície invisível de atração” pois todos os arcos (tanto do modelo inferior como do modelo superior) parecem estar a ser atraídos por um plano central. A este fenómeno decidi chamar “planotropismo”. (do autor) ⁷²

⁷² Tropismo é o fenómeno biológico que orienta o crescimento de um organismo em resposta a um estímulo ambiental. Da mesma maneira que se classifica o crescimento de uma planta em atração à luminosidade de fototropismo, ou à água de hidrotropismo, decidi classificar o fenómeno de atração ou repulsa de um corpo a um ponto de “pontotropismo”, uma reta de “retotropismo” e um plano de “planotropismo”.

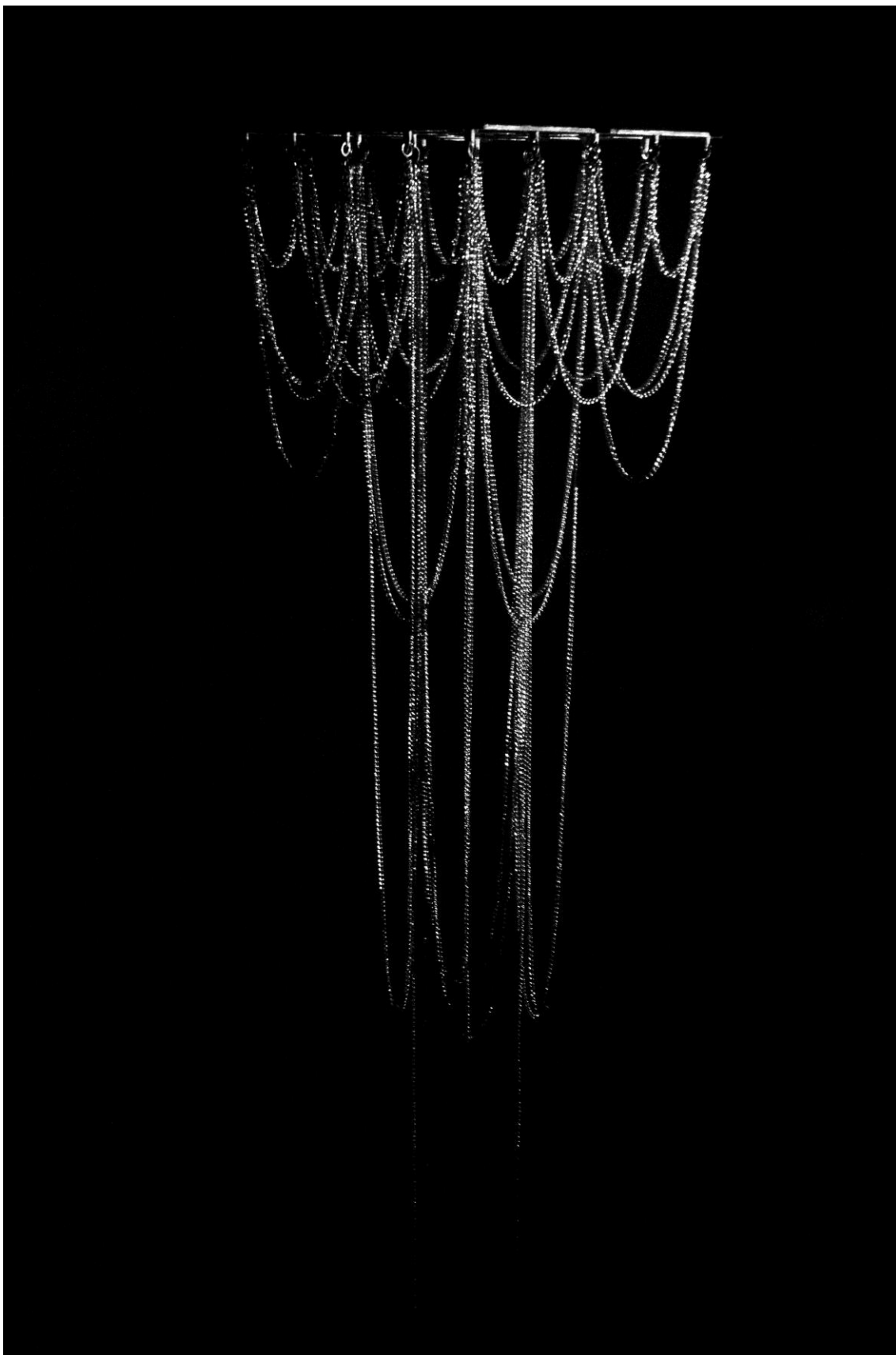


Fig. 135 – Capitel funicular. Materiais: correntes, argolas e chapa metálica cortada a lazer. (do autor)

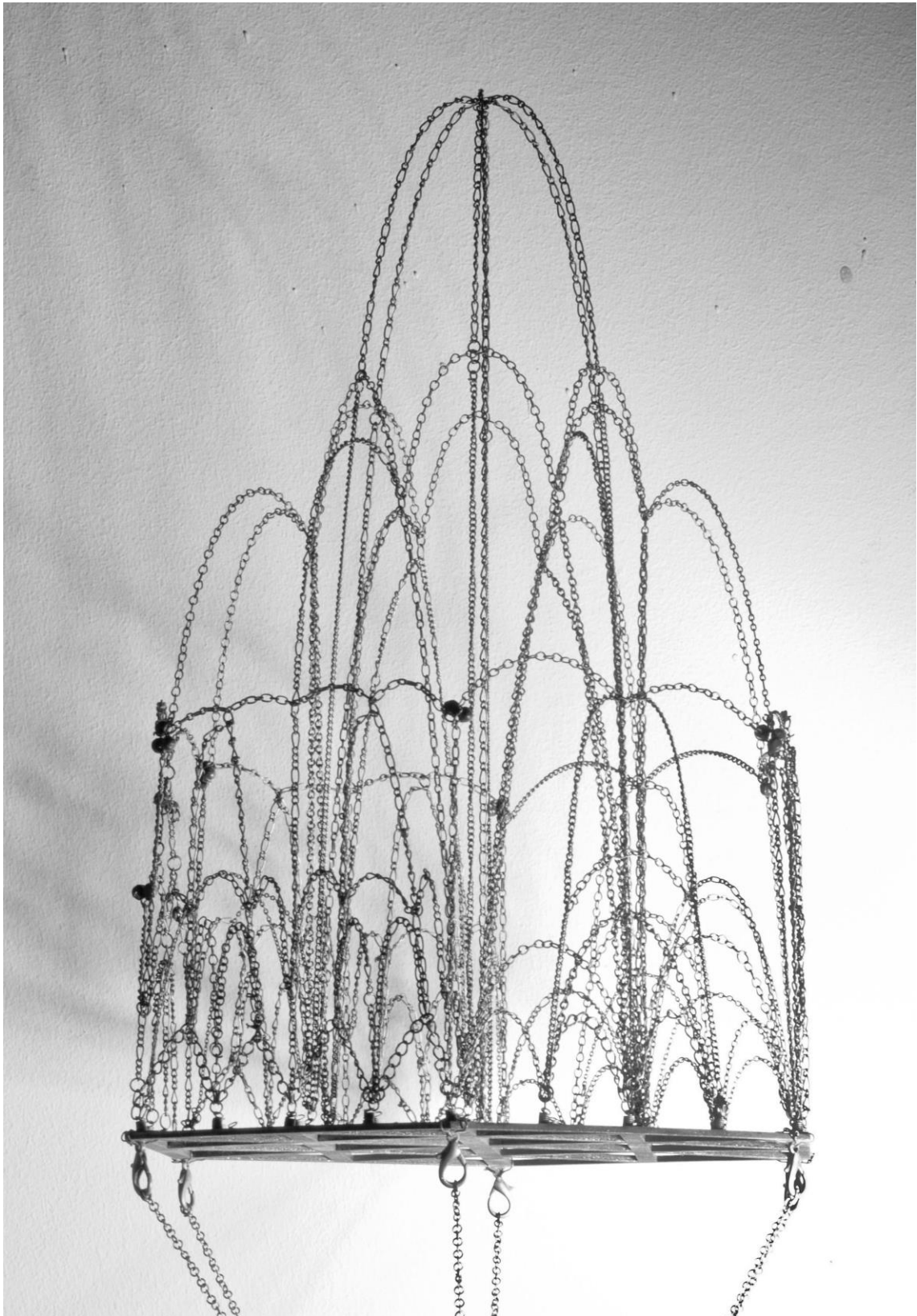


Fig. 136 – Estrutura antifunicular com diferentes pesos. Os pesos permitem amenizar os impulsos horizontais transportando as cargas para a direção vertical. Materiais: correntes, argolas, chumbos e chapa metálica cortada a laser. (do autor)



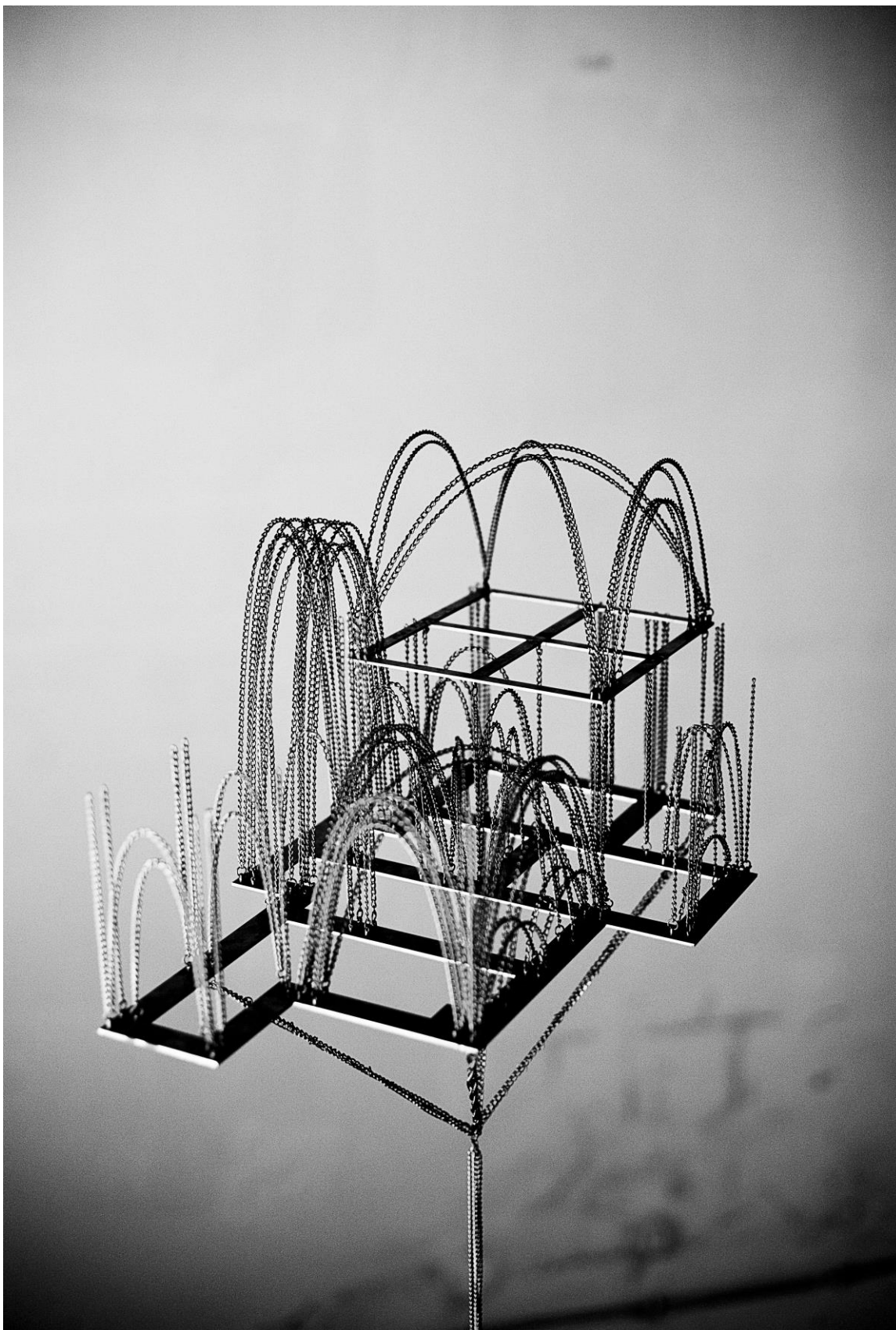


Fig. 137 – Estrutura antifunicular de uma casa com dois pisos formada por abóbadas de canhão e abóbadas cruzadas de catenárias com diversas flechas e comprimentos. Materiais: correntes, argolas, chumbos e chapa metálica cortada a laser. (do autor)



5.2 Modelos cinéticos

A indução de movimentos em modelos funiculares desencadeia soluções que podem auxiliar a análise do comportamento de estruturas perante fenómenos dinâmicos, conceber distintas soluções estruturais estáticas através de um único modelo, e claro, gerar estruturas arquitetônicas cinéticas.

As estruturas comprimidas são compostas por materiais passivos, ou seja, materiais com pouca elasticidade que não se adaptam facilmente a novas condições de equilíbrio. Quando ocorre uma deformação nas estruturas de pedra, tijolo ou betão é provável que estas estejam próximas da rutura. Ao contrário destas, as estruturas compostas por materiais que resistem à tração são ativas, ou seja, elas têm uma maior capacidade elástica e adaptam-se com mais facilidade a novas soluções de equilíbrio. É o exemplo dos cabos de aço ou as membranas de tecido (PFTE, PVC etc.). Assim sendo, é mais fácil criar uma estrutura cinética funicular (à tração) que uma antifunicular (à compressão).

Existem diversos movimentos que podem deformar os modelos funiculares. Estes podem ser decompostos em três tipos:

- Movimentos radiais gerados pela rotação do modelo ao longo de um eixo. Este movimento gera uma força centrípeta que impede a dissipação da matéria e uma “pseudoforça” centrífuga (resultado da força inercial das correntes no ar) que provoca o seu afastamento. Quanto maior a velocidade deste movimento maior a tendência dos arcos em afastar-se do eixo giratório (Fig. 138);

- Movimentos de translação gerados pelo deslocamento linear de um ou mais pontos da estrutura ao longo de qualquer direção, sentido e intensidade. Na Fig. 140 são demonstrados diferentes momentos da translação vertical de um único ponto e a consequente articulação do resto da estrutura;

- E movimentos de vibração gerados pela alteração do sentido, direção e velocidade de diferentes forças no corpo. A criação de vibrações forçadas poderá informar a trajetória das linhas de pressão face a diferentes energias que possam atuar na estrutura.

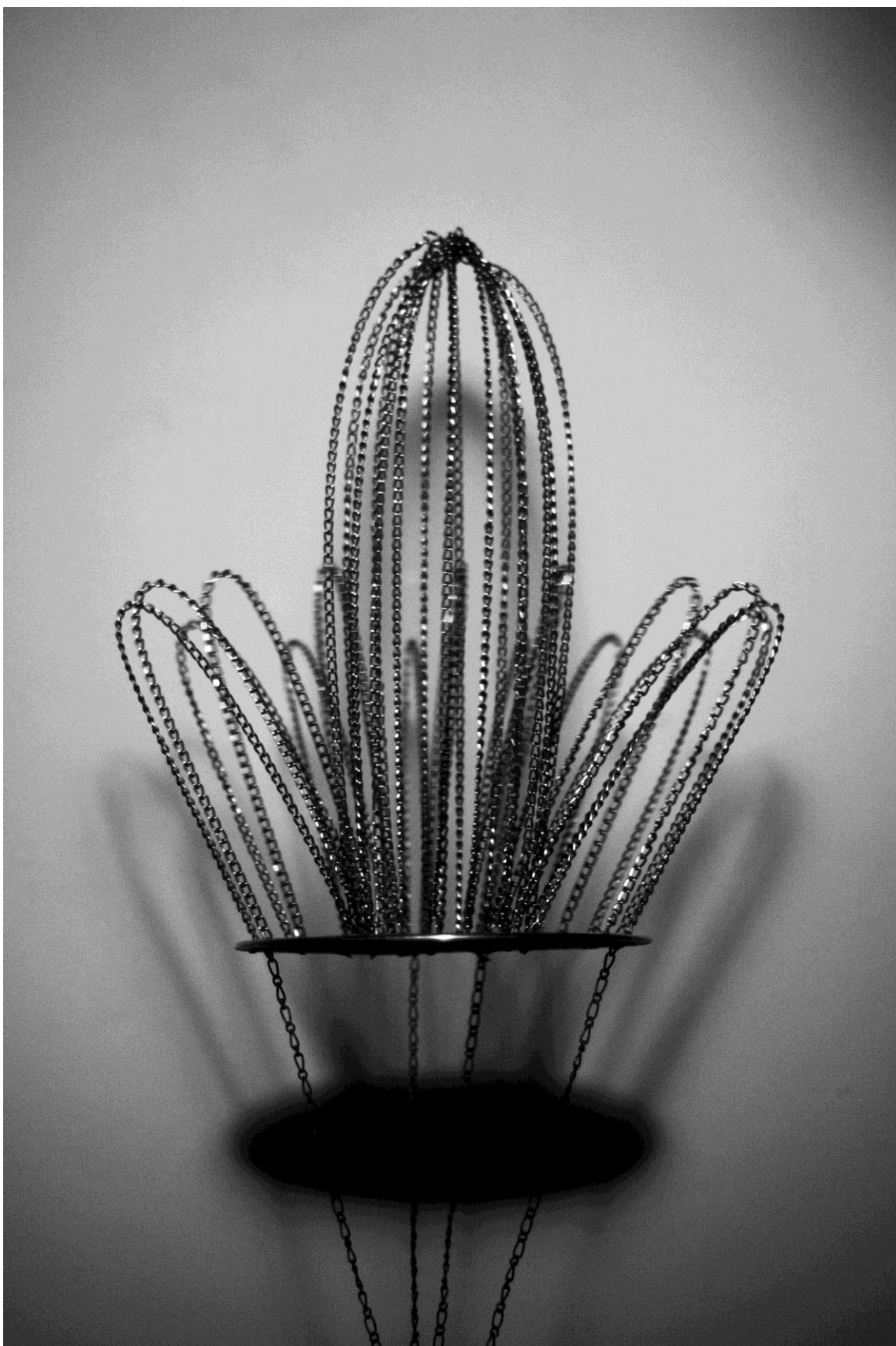


Fig. 138 – Modelo antifunicular gerado por um movimento de rotação. Quanto maior a velocidade, maior o afastamento dos arcos exteriores. Materiais: correntes, argolas, passe-vite. (do autor)



Fig. 139 – O movimento do modelo foi gerado pela translação do apoio central ao longo de um eixo vertical. Este é consequente da ligação do ponto a um fio de nylon que por sua vez está conectado a um carrete. O fio sobe e desce à medida que o carrete gira no sentido positivo e negativo através de um motor. Materiais: correntes, argolas, aro de bicicleta, motor de passo, carrete e Arduino Uno. (do autor)

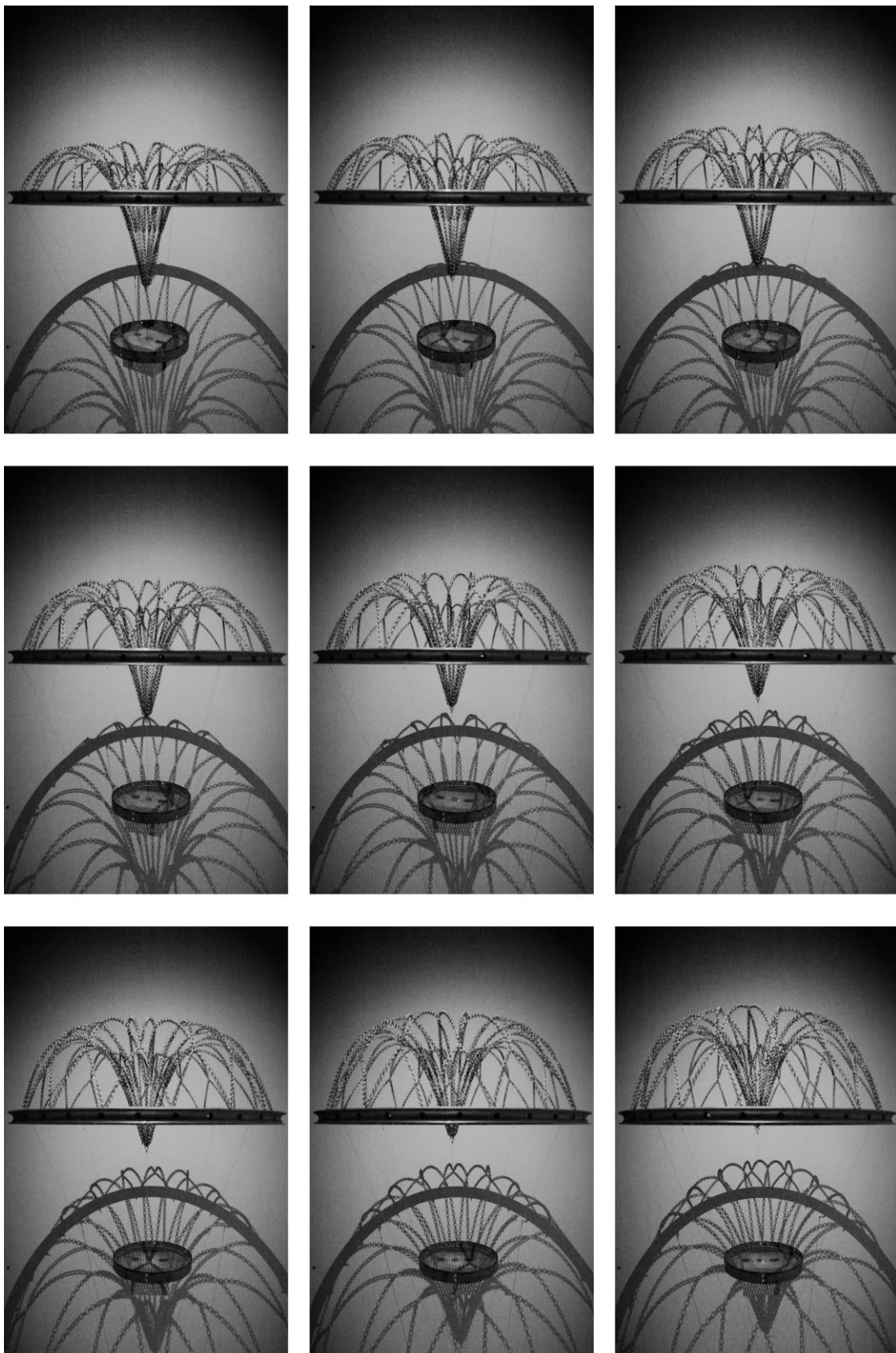


Fig. 140 – Sequência do movimento. (do autor)

5.3 Fixação e inversão

Quer seja para a procura da forma, quer seja para a posterior análise estrutural, a fixação e inversão de modelos pode ser feita com vários materiais. Como exposto anteriormente (ver capítulo 2.3), Heinz Isler endureceu os seus modelos de tecido através de um aglutinante resinoso, gesso ou da solidificação da água em baixas temperaturas.

Contudo existem muitos outros tipos de modelos funiculares e colantes que podem ser usados, como: modelos de correntes solidificadas com cola quente, gazes de gesso endurecidos com água pulverizada, rendas enrijecidas com cola branca e mosaicos em rede agregados com cimento cola.



Fig. 141 – A fixação e inversão dos modelos de correntes pode ser feita com recurso a solda, argamassa fina ou cola. Dependendo da variação da quantidade de fixante em cada elo, sucederão mais ou menos deformações na forma total que originaram estalactites (funiculares) ou estalagmites (antifuniculares) dependendo da orientação da estrutura. Este fenómeno processa-se em diversas escalas fractais (da estrutura como um todo até ao seu pormenor). (do autor)

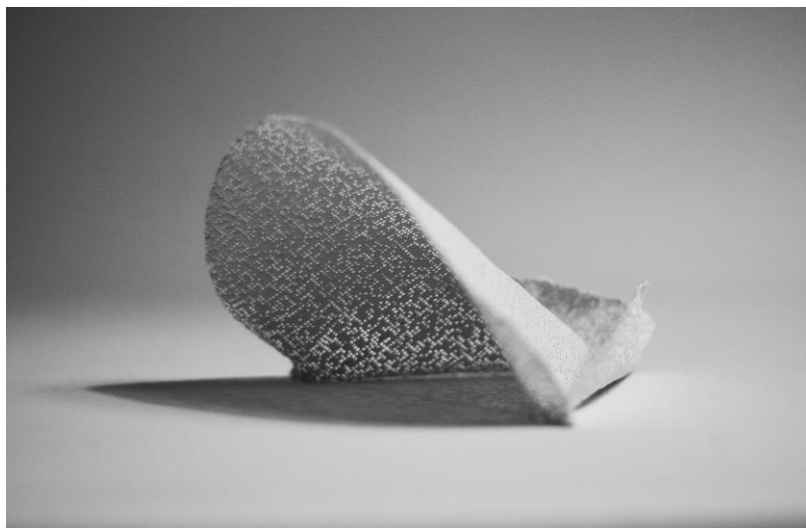


Fig. 142 – Modelos de gaze de gesso solidificados com água pulverizada. O primeiro e o segundo modelo foram invertidos, contudo, o terceiro foi rodado. É interessante verificar que no modelo inferior toda a sua forma contraria a resistência do ar ou da água que ela sentiria em movimento (pois que, tal como a gravidade, estas forças, em estados não caóticos, são uniformemente distribuídas) sugerindo assim, a sua possível aplicação em veículos terrestres e aquáticos. (do autor)



Fig. 143 – Os modelo antifuniculares de rendas com cola branca permitem encontrar estruturas extremamente complexas compostas por uma intrincada variação de cheios e vazios que possibilitam a entrada e difusão da luz em padrões inesperados. (do autor)

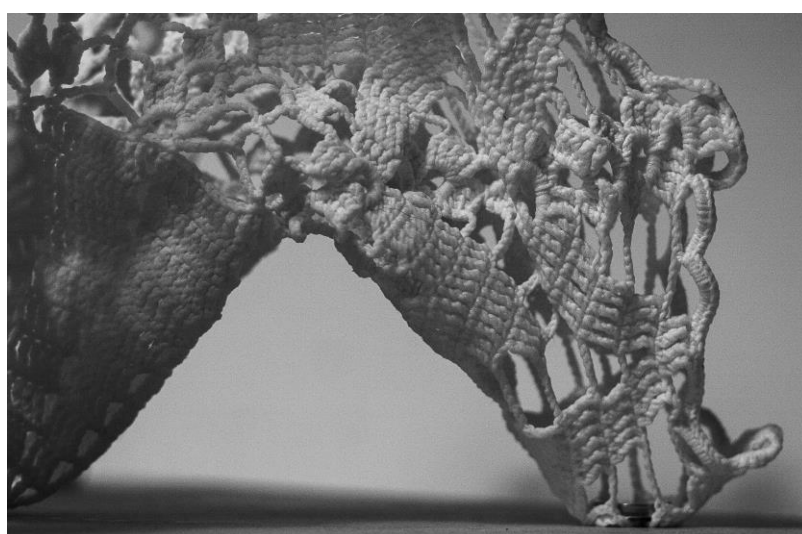
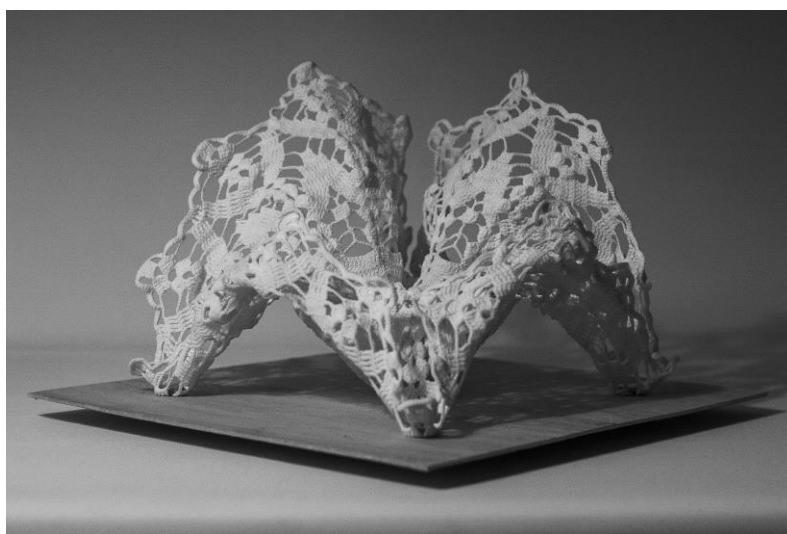


Fig. 144 – Modelo assimétrico de rendas e cola branca. (do autor)

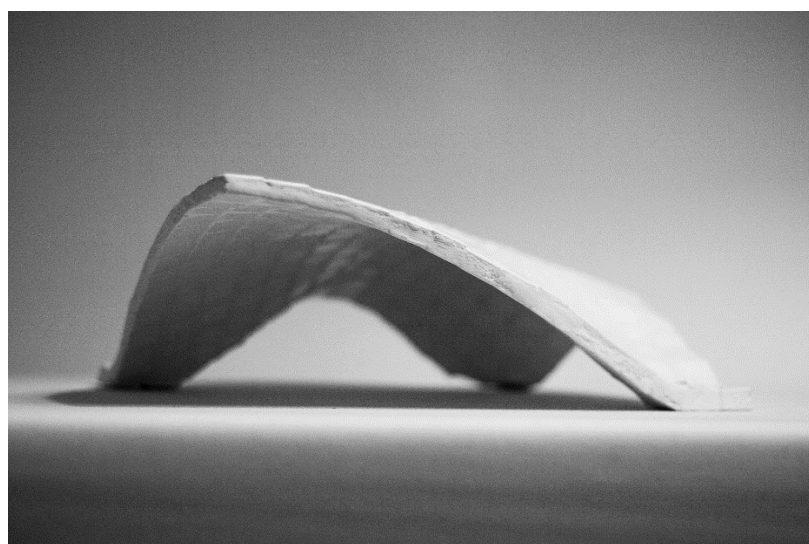
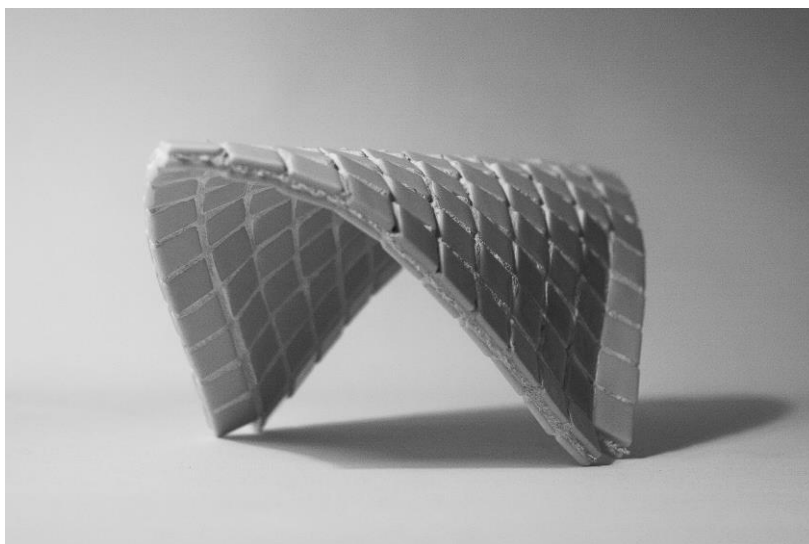


Fig. 145 – Cascas constituídas por folhas de mosaico e cimento cola. Realizado através da ação da gravidade sem qualquer cimbre. (do autor)

Além da fixação e inversão desencadear novas soluções geométricas, este método pode ser utilizado como sistema construtivo.

Para prosseguir para a construção de uma abóbada através deste sistema foram realizados diversos modelos com mosaicos (Fig. 145). Estes são compostos por uma rede (que resiste à tração) e pelos mosaicos de vidro (que resistem à compressão). O espaço existente entre os mosaicos permite a maleabilidade do tecido e, assim, a sua suspensão antes de ser agregado com cimento.

Este processo torna possível contruir estruturas invertidas extremamente leves e complexas sem o recurso a quaisquer cimbres e cofragens (possibilitando uma economia de material e tempo). Contudo, na escala real, o processo levanta uma outra dificuldade: a inversão da estrutura funicular em antifunicular.

Dependendo do peso e da resistência do material é possível a inversão de estruturas com vãos de diferentes dimensões sem qualquer cimbra.

Através desta ideia foi construída uma abóbada de 1.45m de comprimento, 0.60m de largura, 0.45m de altura e 2cm de espessura. Esta é constituída por uma geogrelha, cacos de cerâmica e cimento cola, combinação de materiais que permite numa primeira fase uma maleabilidade essencial para a suspensão da forma funicular (através do tecido e da dimensão e afastamento dos cacos) e, numa fase posterior, uma ótima resistência à tração (da geogrelha) e à compressão (da cerâmica e cimento). Além disso, a sua execução é muito económica uma vez que não requer qualquer cimbra e tanto a cerâmica como o tecido podem ser reaproveitados.

Para a criação da abóbada, o primeiro passo foi a suspensão do “tecido” e a colocação dos cacos cerâmicos (com cerca de 5mm de espaçamento). Este definiu a forma ideal funicular, que foi posteriormente enrijecida através do preenchimento das juntas com cimento-cola. A estrutura foi então invertida e colocada uma segunda fiada de tijoleira.

Após a inversão da estrutura foi necessário contrariar os impulsos horizontais para impedir a sua abertura através de diferentes apoios.



Fig. 146 – Estágios da construção da abóbada antes da sua inversão. (do autor)



Fig. 147 – A cerâmica é um dos materiais mais desperdiçado na construção, e este desperdício gera resíduos que são geralmente despejados em aterros e acabam por afetar a fertilidade de grandes extensões de solo. Deste modo, através do reaproveitamento da cerâmica, a técnica permitiu diminuir o seu impacto ambiental. (do autor)



Fig. 148 – A eficiência estrutural da casca de 1.45m de comprimento, 0.60m de largura, 0.45m de altura e 2cm de espessura é possível devido à elevada resistência da cerâmica à compressão e à sua geometria antifunicular. (do autor)

6. Polifuniculador

A evolução da arte e arquitetura está intimamente ligada ao desenvolvimento do meio de expressão. No caso dos modelos expostos, existem algumas limitações que motivam o desenvolvimento de outros meios:

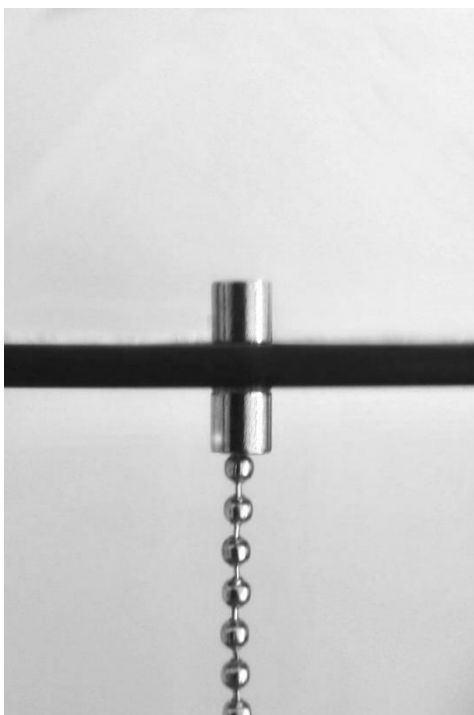
- A necessidade de uma base horizontal com os diversos pontos de apoio antes do desenvolvimento da forma;
- A incapacidade de mover os seus apoios. A planta optada inicialmente determina todo o processo;
- A impossibilidade de visualizar ambas as soluções (funicular e antifunicular) em simultâneo. É necessário o registo fotográfico ou a fixação para a sucessiva inversão da forma;
- A demora no processo de conexão dos elos das correntes.

Estas restrições limitam o fluxo do processo e o seu resultado, pois cada opção é determinante ou demora a ser alterada. Foi esse o motivo que conduziu à criação de um novo instrumento – o Polifuniculador.⁷³

O fim do Polifuniculador é permitir a manipulação dos apoios e conexões em qualquer fase, viabilizar a manipulação rápida e intuitiva da forma e possibilitar a visualização simultânea de ambas as soluções funicular e antifunicular.

O Polifuniculador é um instrumento simples. Ele é composto por: um espelho suspenso horizontal; imanes; e pelos diferentes materiais que compõem a estrutura (como correntes, tramas ou tecidos). Pode ainda ser utilizada uma planta de referência aos pontos de apoio (contudo, ela não é vinculativa).

⁷³ O termo Polifuniculador provém do grego polloí (muitos) e do latim funiculum (funicular). O autor decidiu denominar Polifuniculador ao instrumento, pois este é capaz de gerar múltiplas soluções estruturais funiculares e antifuniculares simultaneamente.



Este processo permite uma manipulação fácil dos diferentes pontos de apoio e elos, uma vez que basta adicionar, remover ou deslizar os imanes pelas correntes ou espelho para alterar a sua posição.

Após cada alteração local, todo o modelo deformar-se-á até repousar numa ordem coerente e harmoniosa.⁷⁴

Fig. 149 – Os imanes são posicionados em ambas as faces do espelho suspenso (virado para baixo) e são eles que unem e suportam as correntes, tramas ou tecidos que formam as diferentes estruturas funiculares. (do autor)

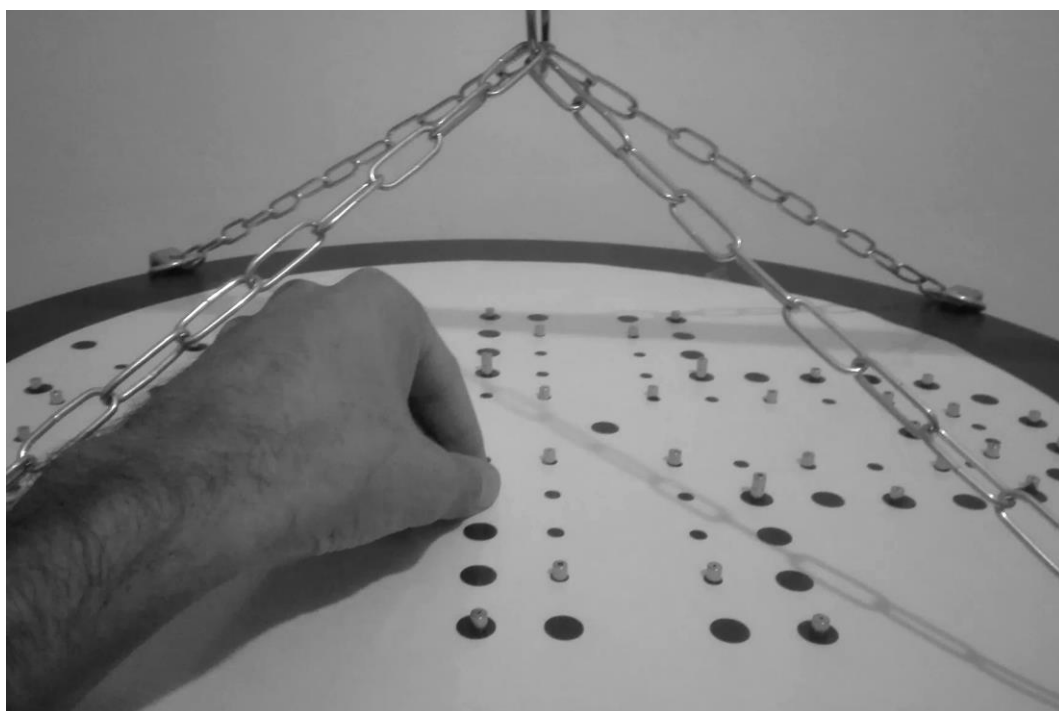


Fig. 150 – É possível o uso de uma planta de referência, para definir as posições dos diferentes apoios. (do autor)

⁷⁴ Em 2019, Márcio Sequeira criou um kit estrutural com um princípio semelhante, o Mola 3. O Mola é um instrumento físico interativo que simula o comportamento de estruturas. Ele é composto por um conjunto de peças moduladas, que se conectam por meio de magnetismo, permitindo inúmeras combinações. Com o Mola 3 é possível montar diferentes sistemas estruturais (pórticos, treliças, de integridade tensionada, polifuncionais, etc.) e visualizar os movimentos e deformações dos seus elementos. Tal como o Polifuncionador, o kit também possui um conjunto de correntes cujos apoios são feitos com imanes.



Fig. 151 –Além dos apoios, as diversas conexões entre correntes são feitas com imanes. (do autor)

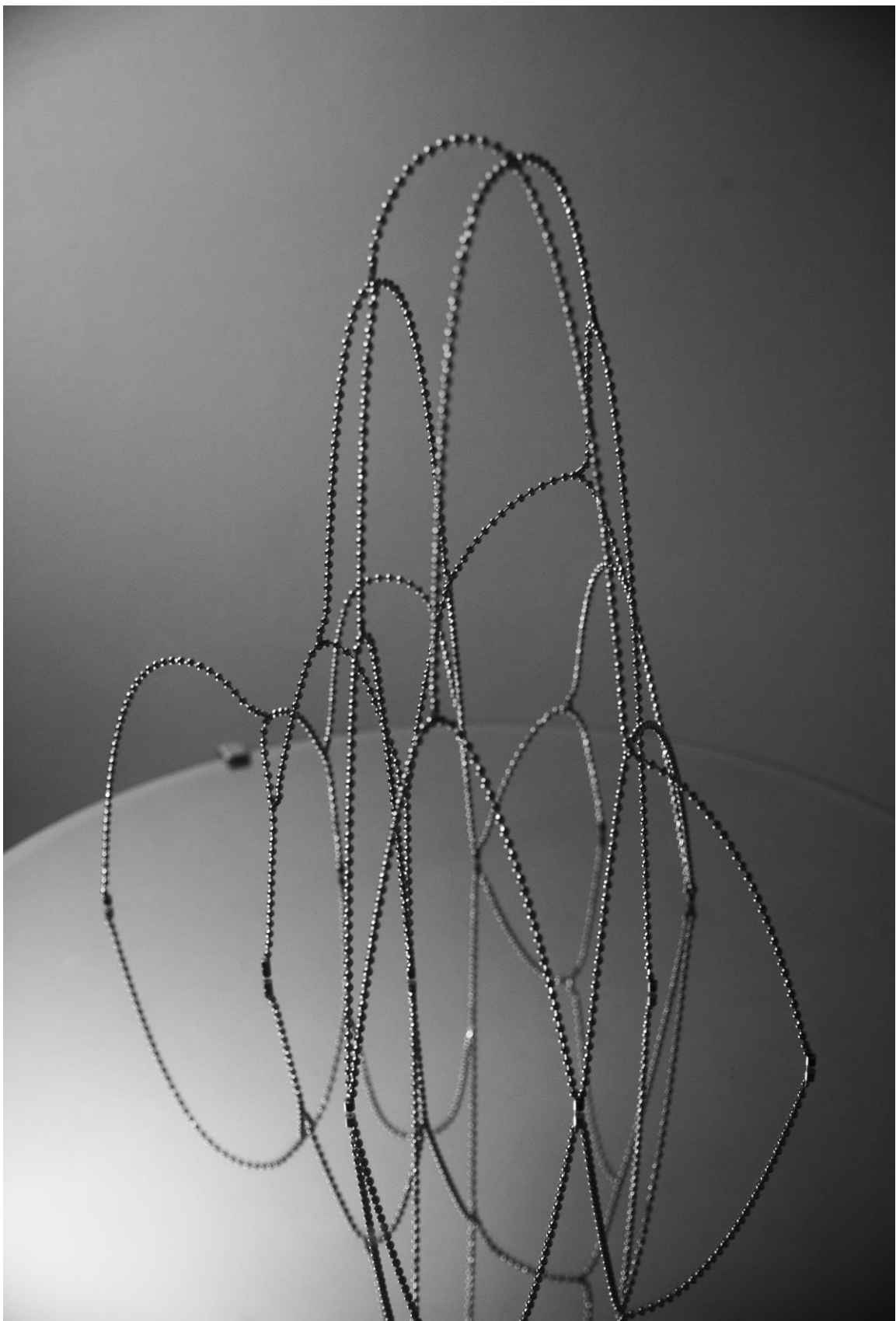
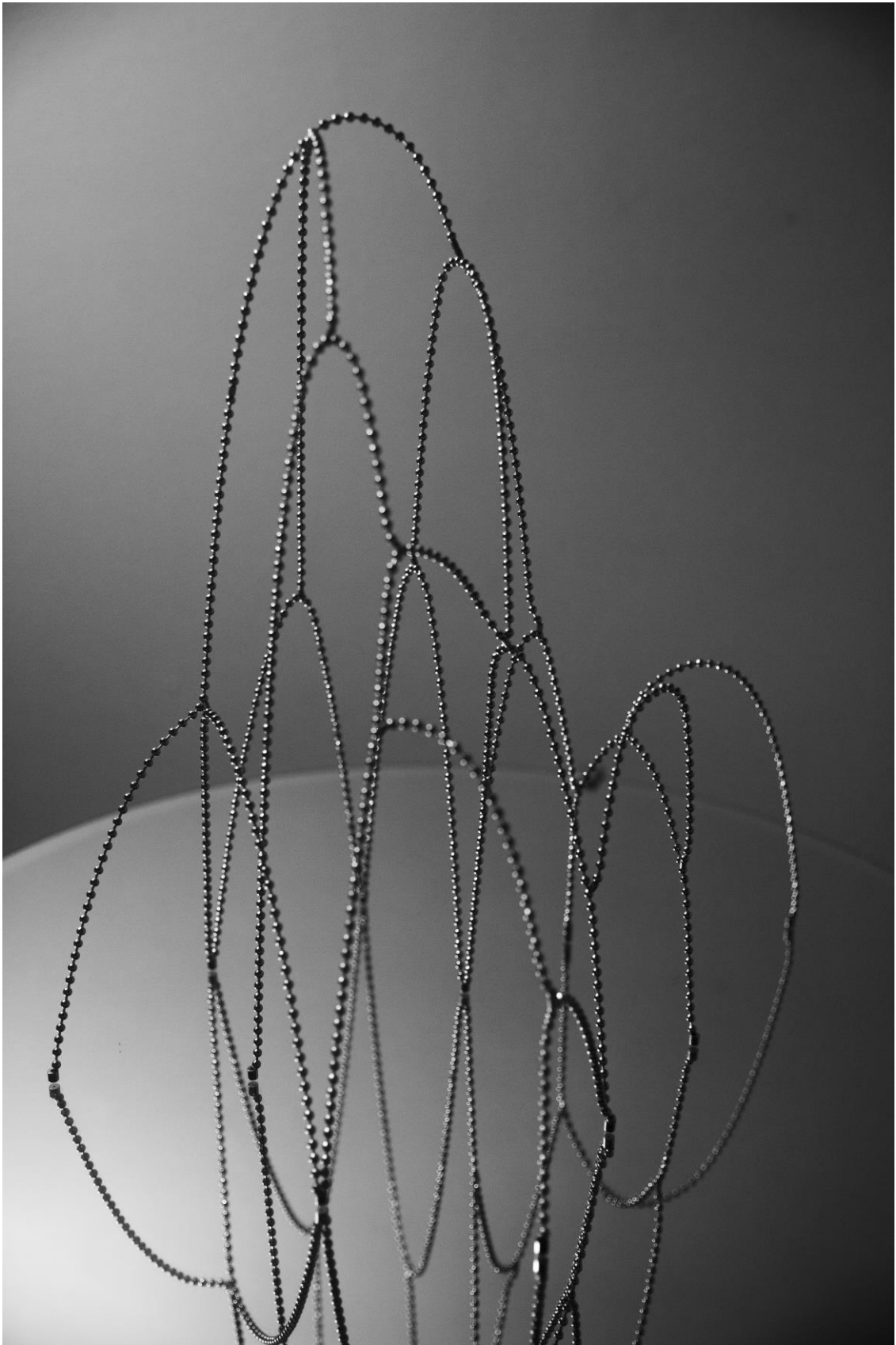


Fig. 152 - Perspetivas de um modelo realizado com o Polifuniculador. (do autor)



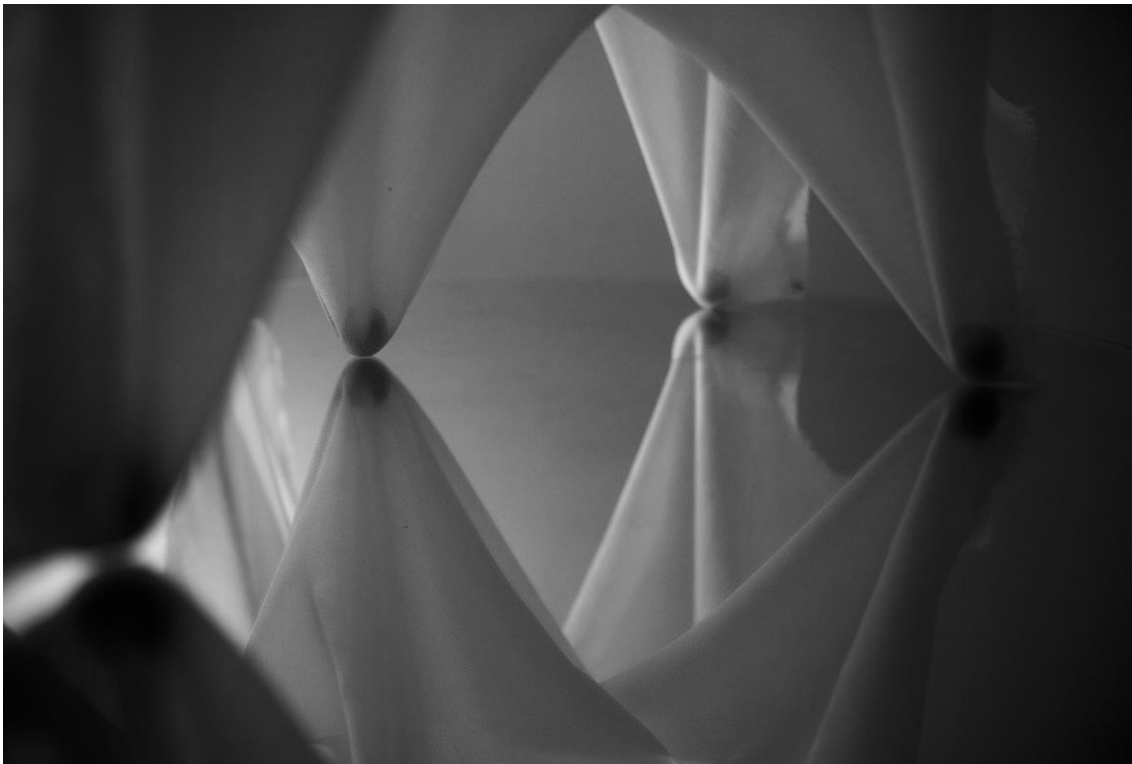
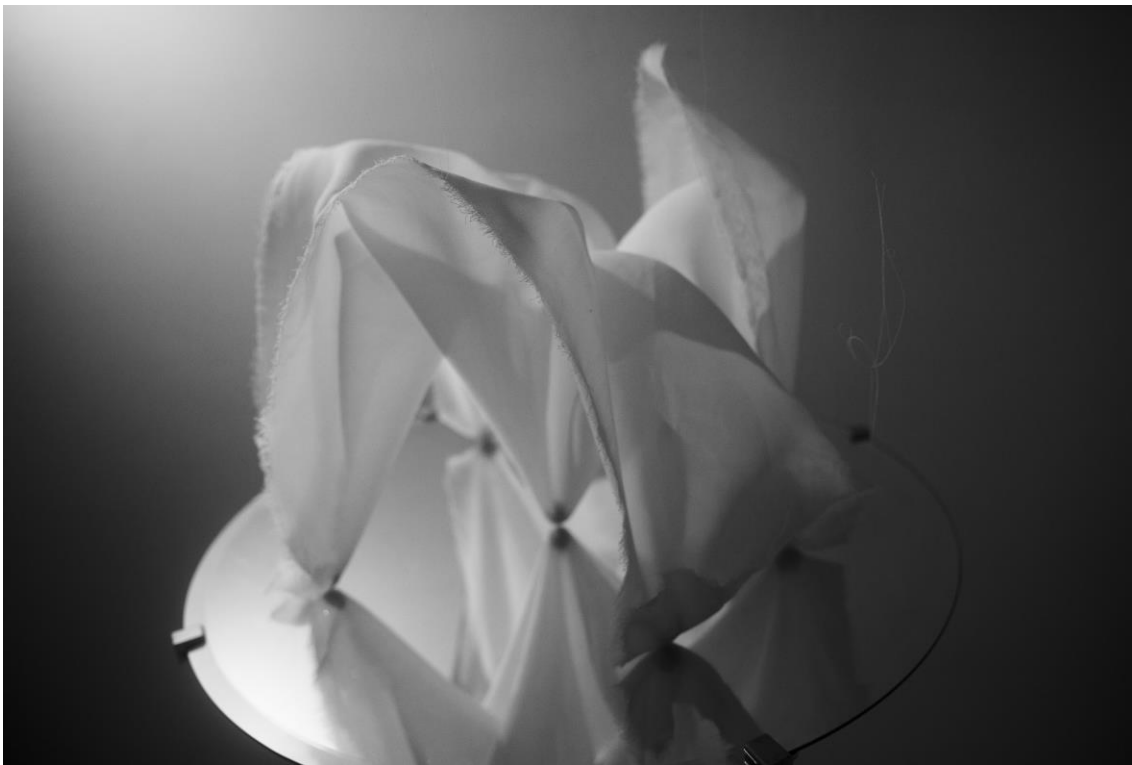


Fig. 153 – É possível manipular outros materiais como redes ou tecidos. (do autor)

6.1 Captação e manipulação digital de resultados

O Polifuniculador é um instrumento que viabiliza a observação sincronizada de ambas as soluções funicular (à tração) e antifunicular (à compressão) através de uma conceção intuitiva.

Porém, é importante que as formas possam evoluir no ambiente digital pois este permite a identificação das coordenadas dos seus pontos, o registo de vistas ortométricas, axonométricas ou perspéticas, a criação de diferentes operações geométricas (nas diversas escalas do objeto), a análise computacional de vários parâmetros da geometria (análises térmicas, ambientais, estruturais, etc.), a renderização e, eventualmente, a fabricação auxiliada por computador (CAM).

Para a captação de soluções estáticas, a fotogrametria e o varrimento a laser podem ser a solução mais prática. Contudo, para a criação de estruturas cinéticas, avaliação de eventuais deformações mecânicas e captação de todo o processo de procura da forma, é necessário registar as quatro dimensões da forma: a altitude, latitude, longitude ao longo do tempo. Para tal é necessário utilizar captura de movimento (conhecido por *motion capture* ou MOCAP).

No início da exploração de captura de movimento (nas décadas de 70 e 80) o sistema era aplicado para a análise biomecânica humana e animal (principalmente para análises clínicas e desportivas). Contudo, ao longo dos últimos anos, a utilização da tecnologia expandiu-se da análise de movimentos biomecânicos para a sua interpretação em animação, cinema e videojogos. É em ambos os sentidos que a técnica pode ser aplicada na arquitetura. Por um lado, é possível analisar com elevada precisão a posição das partículas ao longo de um período temporal. Por outro, é possível interpretar os dados da captação e produzir novas geometrias associadas ao seu movimento.

A partir destes movimentos podemos observar um princípio fundamental dos sistemas holísticos. Quando uma partícula vibra, todas as outras ressoam em cadeia. Tudo está conectado.

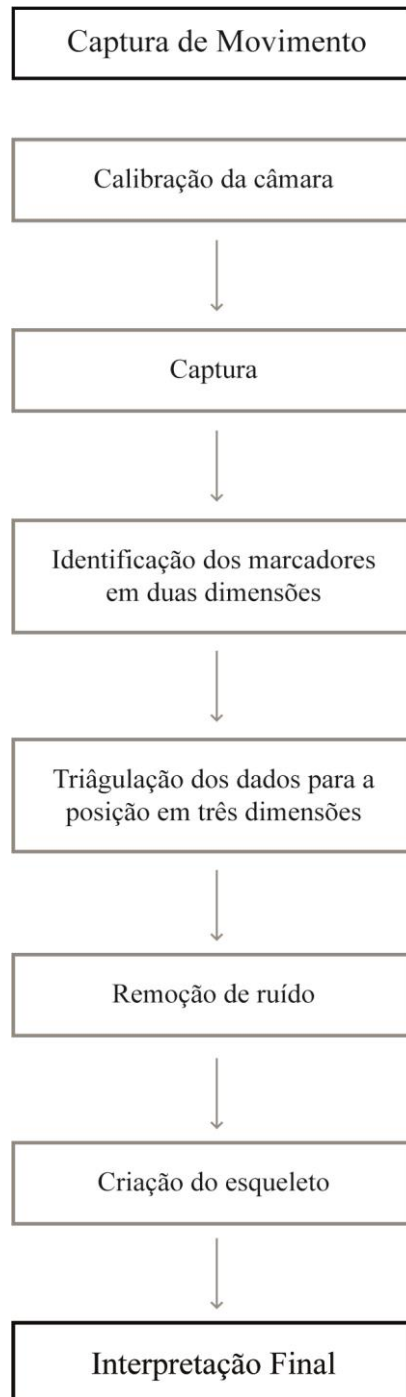


Fig. 154 - Diagrama de fluxo de trabalho de MOCAP.

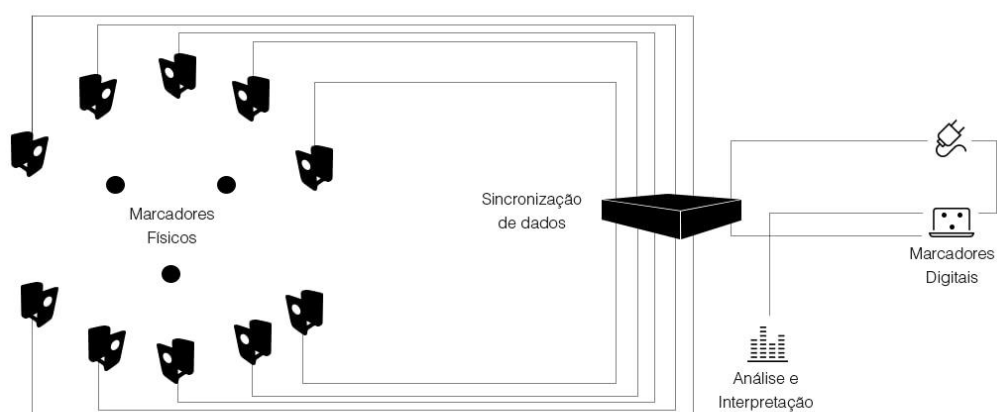


Fig. 155 – Esquema simplificado da ligação dos componentes da captação de movimento (adaptado de um diagrama da Vicon).

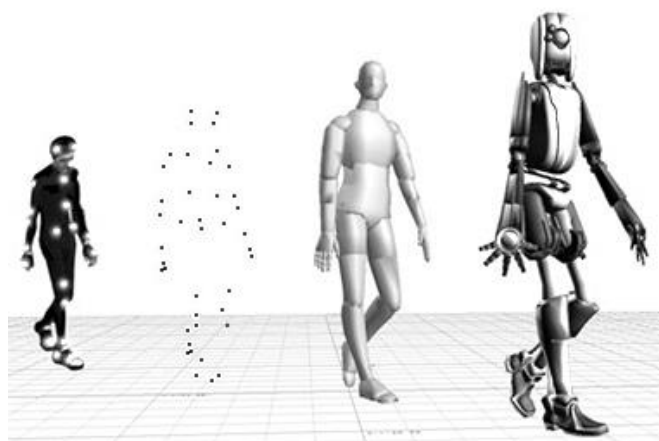


Fig. 156 – Sequência da captação e tratamento de dados. A captura de movimento não é realizada sobre o corpo inteiro, mas sobre marcadores estrategicamente dispostos nele. No caso, os marcadores são passivos (ao invés de emitirem luz, eles refletem uma determinada onda lumínea, os infravermelhos). Após a captação dos marcadores é possível gerar o esqueleto e o avatar da estrutura cinética. (autor desconhecido)



Fig. 157 – Para converter as correntes em marcadores elas foram pintadas de negro e revestidas com fita refletiva (marcadores). A fita reflete os infravermelhos que são emitidos pelos leds situados ao redor das objetivas das câmaras de filmar que, por sua vez, são qualificadas para a captação desta onda lumínea. (do autor)

De que há conhecimento, a aplicação de captação de movimento em estruturas polifunculares nunca foi realizada. No entanto, ela apresenta algumas vantagens:

- A baixa ocultação da forma pois são utilizadas várias câmaras que cobrem diversos ângulos da estrutura. Quanto mais câmaras captarem o movimento do objeto maior a redundância e precisão do registo;

- A visualização do movimento no ambiente digital em tempo real. Através da captura de movimento é possível ver a ação do modelo digital ao mesmo tempo que a ação está a acontecer no modelo físico;

- A quantidade de dados e modelos que podem ser registados dentro de um determinado período temporal é extremamente elevada, o que permite a realização de vários testes num curto espaço de tempo (nos modelos expostos das páginas seguintes foram captados o movimento de aproximadamente 300 marcadores em dois minutos);

- O registo da trajetória de cada partícula das diversas linhas de pressão permite compreender a sua atividade ao longo do tempo. Estas informações permitem a compreensão e atuação perante certos fenómenos que ponham em causa a estabilidade da estrutura;

- A possibilidade de captação de movimentos e interações físicas das partículas viabiliza tanto a apreensão de diferentes estruturas estáticas como a captura de estruturas cinéticas. Esta é a grande vantagem da utilização do Polifuncionador com captura de movimento. A possibilidade de introduzir uma nova dimensão às estruturas polifunculares – o tempo;

Esta união entre o processo físico e digital experimenta o melhor dos dois mundos. Numa primeira instância, permite a procura intuitiva de novas estruturas através de um instrumento que oferece uma grande liberdade e controlo (o Polifuncionador); numa segunda, permite a visualização, análise e interpretação rigorosa dos seus movimentos no mundo digital.



Fig. 158 – À esquerda são expostos diferentes momentos do processo de procura da forma com o polifuncionador e à direita a respetiva captação em tempo real dos pontos no ambiente digital. (do autor com a colaboração do Laboratório de Biomecânica da Faculdade de Motricidade Humana da Universidade de Lisboa)

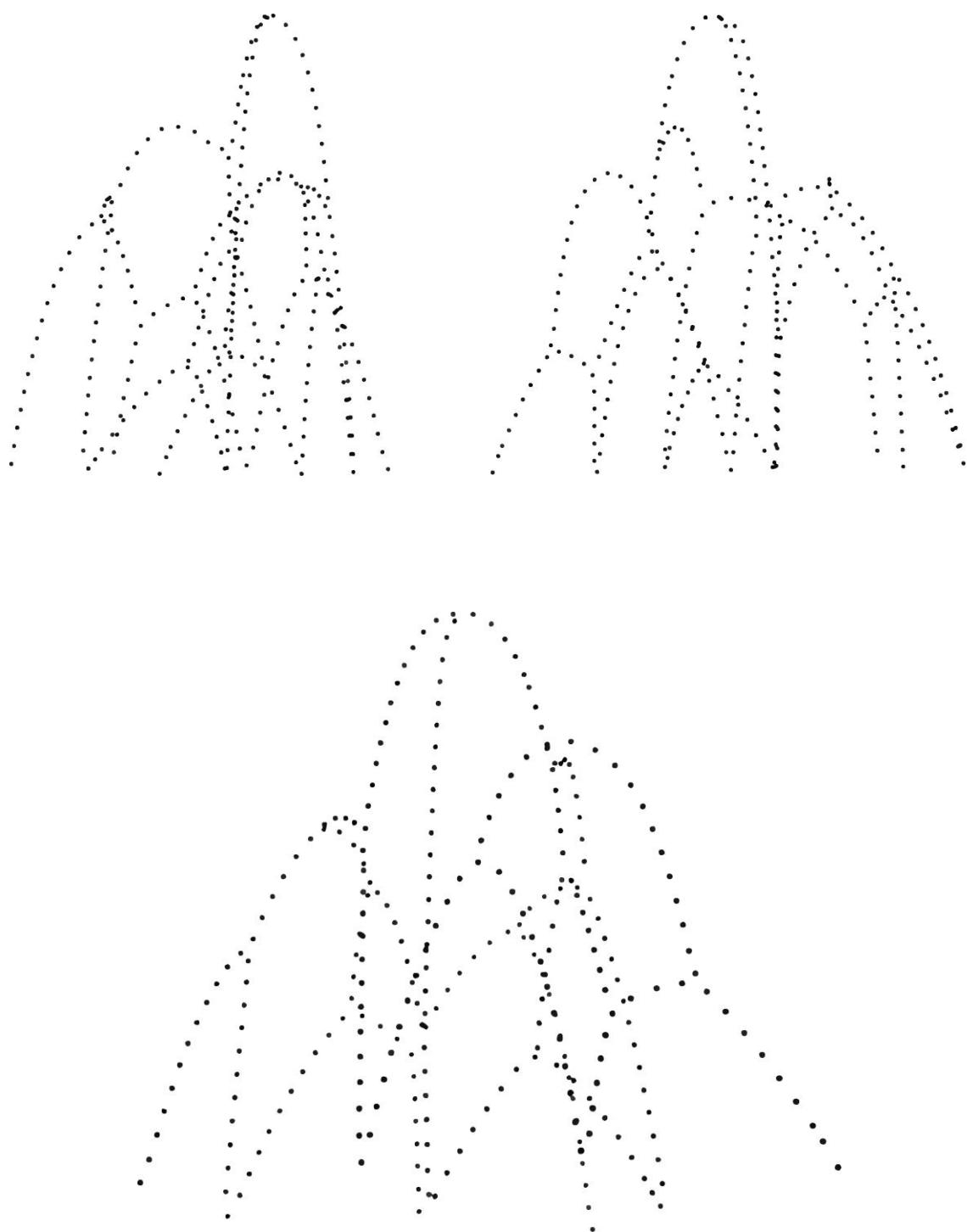


Fig. 159 – Duas vistas ortogonais (em cima) e uma perspectiva (em baixo) de um único momento da captação. (do autor com a colaboração do Laboratório de Biomecânica da Faculdade de Motricidade Humana da Universidade de Lisboa)

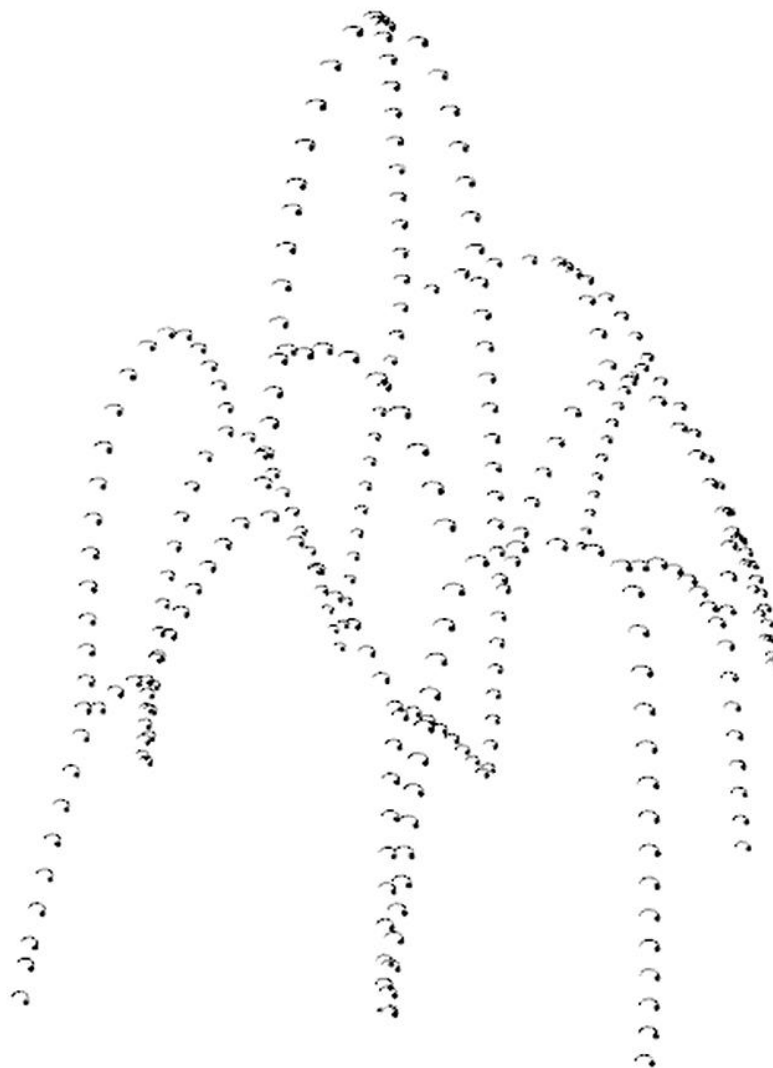


Fig. 160 – A captação da deslocação das partículas produzida por diferentes forças no mecanismo físico permite compreender a dinâmica da linha de pressões ao longo de um determinado período temporal. Isto possibilita o entendimento das diferentes forças que possam atuar na estrutura e, eventualmente, a conceção de soluções estruturais adequadas às mesmas. (do autor com a colaboração do Laboratório de Biomecânica da Faculdade de Motricidade Humana da Universidade de Lisboa)

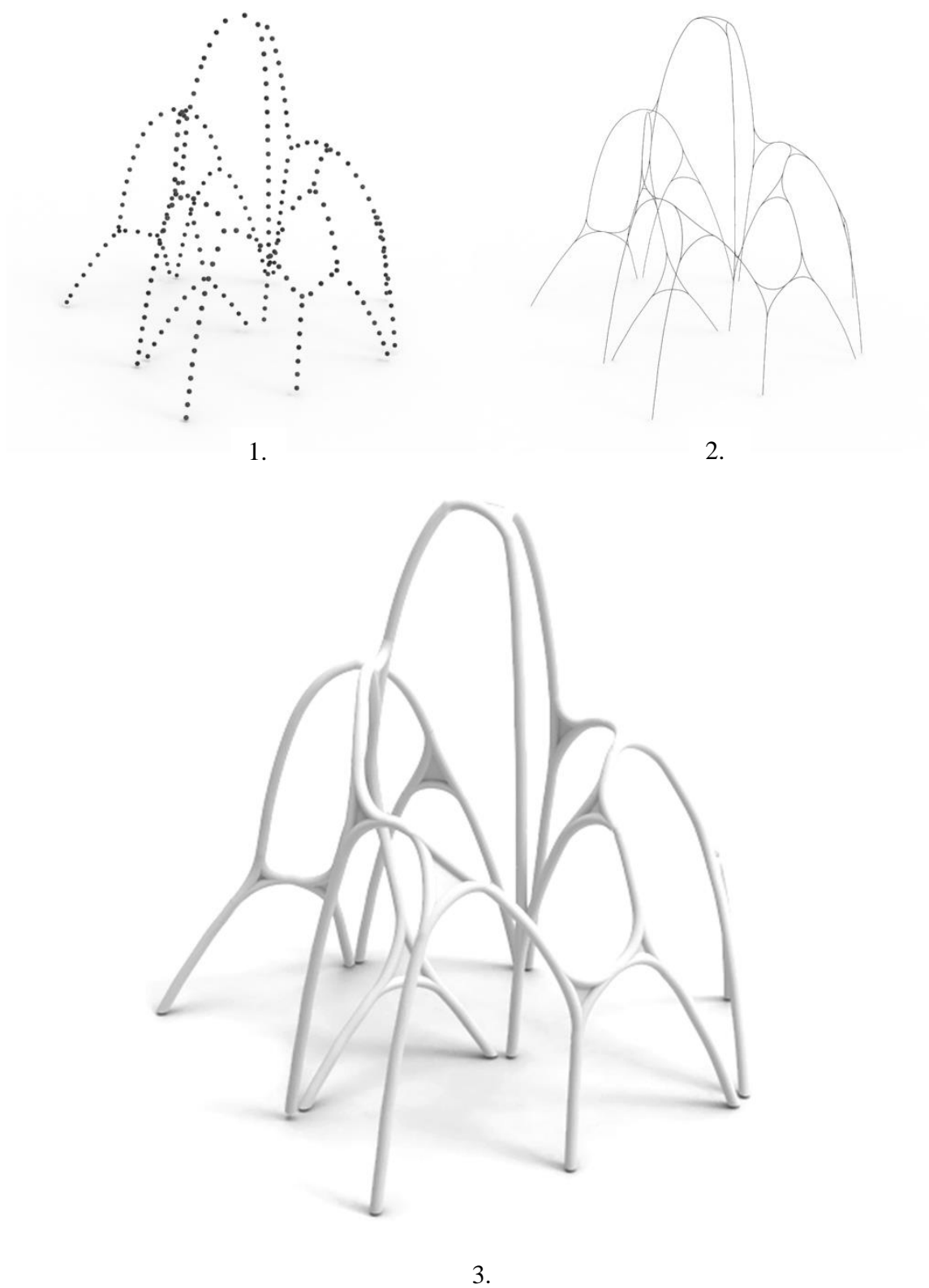


Fig. 161 – Interpretação digital dos pontos (1.) em curvas (2.) e das curvas em tubos (3). (do autor)

Parte V

7. Sugestões para investigações futuras

A criação do Polifuniculador com captação de movimento permite a conceção de formas estruturalmente eficientes num estágio inicial do projeto. Contudo, para materializar estas em diferentes escalas arquitetónicas é necessário desenvolver investigações sobre:

- A exploração de diferentes soluções estruturais estáticas e cinéticas que permitam compreender as potencialidades do processo. Estas podem ser realizadas com outros materiais elástico (como molas) ou articulados (como malhas e tecidos) que possibilitem a criação de estruturas lineares e superficiais passíveis de serem captadas em movimento para o ambiente digital;

- A conceção de ensaios polifuniculares que respondam a desafios estruturais específicos (edifícios com vários pisos, corpos em consola, escadarias helicoidais, etc.);

- O aperfeiçoamento do método de interpretação digital dos resultados através da incorporação de diferentes tipos de parâmetros geométricos e texturas nos dados captados;

- A exploração de sistemas construtivos que permitam a conceção eficiente e económica dos modelos gerados. Neste sentido, as abóbadas de tijoleira, cascas de betão e moldes têxteis podem desencadear soluções interessantes. Contudo, existem muitos outros métodos que podem ser adaptados, entre eles, a impressão 3D. A impressão 3D é normalmente executada com materiais que resistem à compressão (é por esse motivo que a maioria dos protótipos é de paredes). Contudo, com geometrias antifuniculares, é possível cobrir os espaços através de abóbadas compostas por distintos elementos impressos;

- Desenvolvimento de análises matemáticas quantitativas e de testes físicos de resistência estrutural em protótipos à escala real para a validação de segurança e determinação material e dimensional das estruturas.

8. Conclusão

No início da investigação foi colocada uma questão: como criar uma harmonia estrutural entre a forma, as forças e os materiais?

À procura desta relação holística na conceção de estruturas comprimidas foram abordados três temas seguintes: os princípios da teoria moderna de estruturas; os métodos da procura da forma físicos e digitais; e os sistemas construtivos associados a estruturas antifuniculares. Assim, sobre as pegadas de vários arquitetos, engenheiros, construtores, físicos e filósofos percorreu-se um caminho que permitiu entender os fundamentos das estruturas antifuniculares, o seu meio projetual e a sua implementação construtiva.

Contudo, numa fase posterior, a investigação desenvolveu-se com uma outra abordagem, uma abordagem mais pessoal e crítica sobre experiências desenvolvidas pelo autor.

Todos os ensaios partiram de um princípio: quanto maior a deformabilidade do sistema, mais a sua forma se aproximará das forças externas que a sujeitam. A partir dele foram criados vários métodos de procura da forma e um novo instrumento, o Polifuniculador.

Através da exploração deste instrumento verificou-se que a conceção rigorosa, intuitiva e livre de estruturas estáticas e cinéticas polifuniculares pode ser simples e que através da captura de movimento estas podem, inclusivamente, ser compreendidas e adaptadas no ambiente digital em quatro dimensões.

Em última instância, a investigação expressa que a estrutura não é um ramo distante que pode ser integrado no fim do projeto, mas um dos troncos fundadores de uma arquitetura mais leve, eficiente e harmoniosa. Em suma, de uma arquitetura mais natural.

“Choose only one master – Nature.”

Rembrandt ⁷⁵

⁷⁵ “Escolhe apenas um mestre – Natureza.” Rembrandt Van Rijn conforme citado por Nemo P. em “Rembrandt Drawings” (1975).



Fig. 162 – Simulação de uma hipotética instalação concebida através do Polifuniculador. (do autor)

9. Bibliografia

Fundamental:

ALLEN, E. e ZALEWSKI, W. (2008). *Form and Forces: Designing Efficient, Expressive Structures*, Capítulo 8 de OCHSENDORF, J. e BLOCK, P. (2009). *Designing unreinforced masonry*. New York: John Wiley Sons.

BELLAMY, J., BLOCK P, RAMAGE, M., RICH, P., e OCHSENDORF, J. (2010). *Design and Construction of the Mapungubwe National Park Interpretive Centre, South Africa*.

BLOCK, P. (2005). *Equilibrium Systems: Studies in masonry structure*. Dissertação de Mestrado, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

BLOCK P. (2009). *Thrust Network Analysis: Exploring Three-dimensional Equilibrium*. Dissertação de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, USA.

BLOCK, P., DEJONG, M. e OCHSENDORF, J. (2006). *As hangs the flexible line: Equilibrium of masonry arches*. The Nexus Network Journal 8(2), 13–24.

BLOCK, P. e OCHSENDORF, J. (2007). *Thrust Network Analysis: A new methodology for three-dimensional equilibrium*. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures 48(3), 167–173.

BLOCK, P., DAVIS, L., PAWLOVSKY, T., RIPPMANN, M. (2012). *Innovative Funicular Tile Vaulting: A prototype in Switzerland*. The Structural Engineer.

BOADA P. (1929). *El temple de la Sagrada Família*. Editorial Barcino.

CHILTON J. e ISLER, H. (2000). *The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture*. London: Telford.

FIALHO, J. (1991). *Coberturas de Grande Vão – Aspectos da sua Evolução Recente e Metodologias para a Concepção Arquitectónica das Coberturas Traccionadas*. Dissertação de Doutorado. Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.

HEYMAN, J. (1997). *The stone skeleton*. Cambridge: Cambridge University Press.

HUERTA, S. (2003). *El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí*. Ingeniería Civil 130: 121 – 33.

HUERTA, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

HUERTA, S. (2006). *Galileo was Wrong: The Geometrical Design of Masonry Arches*. Nexus Network Journal 8(2):25-52

ISLER, H. (1961). *New shapes for shells*. Bulletin of the International Association for Shell Structures.

MARTÍNEZ, E. (2013) *La bóveda tabicada en España en el siglo XIX: la transformación de un sistema constructivo*. Dissertação de Doutorado. Escuela Técnica Superior de Arquitectura da Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

MUTTONI, A. (2004). *L'art des structures: Une introduction au fonctionnement des structures en architecture*. Press polytechniques et universitaires romande.

OCHSENDORF, J. (2002). *Collapse of Masonry Structures*. Dissertação de Doutorado. University of Cambridge.

OCHSENDORF, J. (2009). *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*. New York: Princeton Architectural Press.

OLIVEIRA, M (2008). *Modelo estrutural qualitativo para pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro-Preto – Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

OTTO, F. e RASCH, B. (1996). *Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*. Edition Axel Menges.

RIPPMANN, M. (2016) *Funicular Shell Design*. Dissertação de Doutorado nº 23307. ETH, Zurich.

WEST, M., ALLEN, E., OCHSENDORF, J., VEENENDAAL, D. e CACERES, R. (2016). *The Fabric Formwork book: methods for building new architectural and structural forms in concrete*. Routledge.

Complementar:

ALBERTI, L. (1452). *De re aedificatoria*.

BARLOW W. (1846) *On the existence (practically) of the line of equal horizontal thrust in arches, and the mode of determining it by geometrical construction*. Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers, v. 5, n. 1846, pp. 162-172.

BARRET, P. and FREEMAN, R. (2016). *The Works of Charles Darwin: Vol 27: The Power of Movement in Plants* (1880). Routledge.

BERGER, H. (1996). *Light Structures, Structures of Light: The Art and Engineering of Tensile Architecture*. Basel Birkhäuser.

BLONDEL, F., PATTE, P. (1777). *Cours d'Architecture ou traité de la decoration, distribution & construction des bâtiments*. Paris.

BRUSCHI, A. (1978). *Scritti rinascimentali di architettura*. Milano: Edizioni il Polifilo.

D'ESPIE, C. (1754). *Manière de rendre toutes sortes d'edifices incombustibles, ou Traité sur la Construction des voutés, faites avec des brics et du plâtre, dites Voutes plate*.

COULOMB, C. (1776). *Essai Sur Une Application Des règles De Maximis & Minimis à Quelques problèmes De Statique, Relatifs à L'architecture*. Paris. De l'imprimerie Royale.

DOBBS, R. (2011). *Urban World: Mapping the Economic Power of Cities*. New York: McKinsey Global Institute.

EWING, J. (1899). *The strenght of materials*. Cambridge: At the University Press.

FREYSSINET, E. (1928) *Procédé de fabrication de pièces en béton armé*.

GUASTAVINO, R. (1892) *Essay on the theory and history of Cohesive Construction*. London: Kegan Paul & Co.

HOOKE, R. (1675) *A Description of Helioscopes and Some Other Instruments Made by Robert Hooke, Fellow of the Royal Society*. London.

HOOKE, R. (1678). *De Potentia Restitutiva, or of Spring. Explaining the Power of Springing Bodies*. London: J. Martyn.

- LEGENDRE, G. (2012) *MatheMatics of space*. Wiley, 2011.
- LESSER, W. (2018) *You Say to Brick: The Life of Louis Kahn*. Farrar, Straus, Giroux.
- LOOMIS, J. (1999) *Revolution of forms: Cuba's forgotten art schools*. Princeton Architectural Press.
- MEISSNER, I. e MÖLLER, E. (2015) *Frei Otto complete works, lightweight construction, natural design*. Birkhauser.
- MAXWELL, J. (1864). *On Reciprocal Figures, Frames, and Diagrams of Forces*. Edinburgh: Neil.
- NEWTON, I. (1686). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*.
- OTTO, F. (1951-1983) *Schriften und Reden*. Capítulo: *Das Zeltdach. Subjektive Anmerkungen zum Olympiadach (1972)*. Berthold Burkhardt e Heinrich Klotz
- PALLADIO, A. (1570). *I Quattro Libri dell'Architettura*. Milano: Ulrico Hoepli Editore
- PUGNALE, A. e BOLOGNA, A. (2015). *Dante Bini's 'New Architectural Formulae': Construction, Collapse and Demolition of Binishells in Australia 1974-2015*. Sydney: SAHANZ, 2015.
- REI, J. e GAGO, A. (2018). *Abobadilha Alentejana – Uma técnica construtiva tradicional*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. nº 6.
- SULLIVAN, L. (1924). *A System of Architectural Ornament according with a Philosophy of Man's Powers*. American Institute of Architects: New York.
- SULLIVAN, L. (1896). *The Tall Office Building Artistically Considered*. Lippincott's Magazine.
- THOMPSON, D. (1917). *On Growth and Form*. Dover Publications
- VARIGNON, P. (1725) *Nouvelle Mécanique Ou Statique: Dont Le Projet Fut donné En M. DC. LXXXVII*. C. Jombert.
- VIOLET-LE-DUC, E. (1863) *Entretiens sur l'architecture*. Morel.
- WITKIN, A. (1997) *Physically Based Modeling: Principles and Practice / Particle System Dynamics*.